Dirección General de Aguas
Ministerio de Obras Públicas
Gobierno de Chile

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
Arica y Parinacota, XV Región

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

E90008-263-STY-004

INFORME FINAL

0	03/04/2014	Apto para Uso	MFH JLV PR	CG	SV	
B	11/03/2014	Revisión y Comentarios del Cliente	MFH JLV PR	CG	SV	
A	05/03/2014	Revisión Interna	MFH JLV PR	CG	SV	
REV N°	FECHA	EMITIDO PARA	POR	REVISADO POR	APROBADO POR	
			AMEC International Ingeniería y Construcción Ltda.			DGA

AVISO IMPORTANTE

Este informe ha sido preparado por AMEC exclusivamente para la Dirección General de Agua (DGA). La calidad de la información, las conclusiones y las estimaciones que aquí se contienen son coherentes con el nivel de esfuerzo involucrado en los servicios de AMEC, los que se basaron en; i) información disponible al momento de la preparación del informe, ii) datos suministrados por fuentes externas y iii) las suposiciones, condiciones y calificaciones establecidas en este informe. Este informe está destinado a ser usado por la DGA solamente, sujeto a los términos y condiciones de su contrato con AMEC. Cualquier otro uso, o confianza depositada en este informe por cualquier tercero, será a riesgo exclusivo de dicho tercero.

CONTENIDOS

PROFESIONALES PARTICIPANTES 13

RESUMEN EJECUTIVO 15

1.0 INTRODUCCIÓN 31
- 1.1 Diagnostico y Definición del Problema 32
- 1.2 Concepto General del Estudio 35
- 1.3 Modelo del Sistema Hídrico del Colpitas 41
- 1.4 Antecedentes Generales 44
- 1.5 Objetivos y Alcances del Estudio 81

2.0 METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO 83
- 2.1 Metodología General de Trabajo 83
- 2.2 Calidad de Agua 83
- 2.3 Calidad de Suelo y Sedimentos 105
- 2.4 Hidrología 112
- 2.5 Calidad Agroclimática 118
- 2.6 Geofísica 125
- 2.7 Topografía 127
- 2.8 Percepción Remota 127

3.0 ACTIVIDADES DE TERRENO Y PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO 132
- 3.1 Campañas de Terreno 132
- 3.2 Presentaciones del Estudio a la Comunidad 145

4.0 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL PROYECTO 150
- 4.1 Calidad de Agua 150
- 4.2 Calidad de Suelo y Sedimentos 218
- 4.3 Hidrología 252
- 4.4 Calidad Agroclimática 265
- 4.5 Geofísica 266
- 4.6 Topografía 272
- 4.7 Percepción Remota 274

5.0 MODELACIÓN 312
- 5.1 Modelo Conceptual Hidrológico 312
- 5.2 Balance Hidroquímico 317
- 5.3 Modelo Conceptual Hidrogeológico 350

6.0 SOLUCIONES ALTERNATIVAS 360
- 6.1 Criterios para la Identificación de Alternativas 360
- 6.2 Desarrollo de Alternativas 361
- 6.3 Aspectos Legales Relativos a Comunidades, Territorio, y Recursos 376
- 6.4 Evaluación de Alternativas 394

7.0 BASE SIG 399

8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 401

9.0 REFERNCIAS 403

10.0 ANEXOS 411

TABLAS

Tabla 1-1: Valores indicativos de la calidad de agua para riego. 33

Tabla 1-2: Vegetación hídrica en el área de influencia directa. 65

Tabla 1-3: Estaciones fluviométricas seleccionadas para la zona de estudio. 71

Tabla 1-4: Resumen de los datos fluviométricos en la estación río Colpitas en Alcérreca. 73

Tabla 1-5: Coordenadas de ubicación de los Puntos de Monitoreo de Calidad del Agua y mediciones de Aforo. 76

Tabla 2-1: Coordenadas de ubicación de los Puntos de Monitoreo de Calidad del Agua y mediciones de Aforo. 84

Tabla 2-2: Coordenadas de ubicación de los puntos de monitoreo de la calidad del agua de consumo de los lugareños. 84

Tabla 2-3: Concentraciones máximas de elementos o compuestos químicos en agua para riego. 89

Tabla 2-4: Parámetros extras a la norma NCH 1333.Of78. 90

Tabla 2-5: Clasificación de aguas para riego según su salinidad. 91

Tabla 2-6: Criterios de aceptación del análisis de validación de datos de balance iónico. 99

Tabla 2-7: Valores de Tcrítico para un nivel de significancia de 1% o 5% para datos alterados de un muestreo normal. 102

Tabla 2-8: Coordenadas de ubicación de las calicatas. 106

Tabla 2-9: Tamices ASTM por N° y sus diámetros en mm. 108

Tabla 2-10: Tamices ASTM por pulgadas y sus diámetros en mm. 109

Tabla 2-11: Parámetros químicos y concentraciones de referencia de calidad de suelo. 110

Tabla 2-12: Registro DGA de caudales medios mensuales (m^3/s) estación Colpitas en Alcérreca. 113

Tabla 2-13: Estadística de caudales medios mensuales (m^3/s) (1960-1990). 114

Tabla 2-14: Estadística de caudales medios mensuales (m^3/s) (1968-2000). 115

Tabla 2-15: Variables agroclimáticas. 120

Tabla 2-16: Métodos utilizados para estimar la evapotranspiración de referencia 123

Tabla 2-17: Características imágenes Landsat 8. 129

Tabla 3-1: Programación de campañas de terreno y actividades realizadas. 133

Tabla 3-2: Ficha resumen visita inicial de reconocimiento de sitio. 134

Tabla 3-3: Ficha resumen Campaña de Terreno N°1. 134

Tabla 3-4: Ficha resumen Campaña de Terreno N°2. 135

Tabla 3-5: Ficha resumen Campaña de Terreno N°3. 135

Tabla 3-6: Ficha resumen Campaña de Terreno N°4. 136

Tabla 3-7: Ficha resumen Campaña de Terreno N°5. 136
Tabla 3-8: Ficha resumen Campaña de Terreno N°6. 137
Tabla 4-1: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°1 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). 152
Tabla 4-2: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°2 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). 155
Tabla 4-3: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). 158
Tabla 4-4: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°4 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). 162
Tabla 4-5: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°5 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). 166
Tabla 4-6: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°6 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). 170
Tabla 4-7: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°2 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). 175
Tabla 4-8: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). 178
Tabla 4-9: Resultados de los parámetros medido en terreno y los análisis de laboratorio de la muestra de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°4 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). 182
Tabla 4-10: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de la muestra de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°5 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). 184
Tabla 4-11: Resultados del análisis isotópico de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°1. 186
Tabla 4-12: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°1. 188
Tabla 4-13: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°2. 189
Tabla 4-14: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°3. 190

Tabla 4-15: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°4. 191
Tabla 4-16: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°5. 192
Tabla 4-17: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°6. 193
Tabla 4-18: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de los datos de las campañas AMEC entre cada punto de monitoreo. 198
Tabla 4-19: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación del análisis isotópico de las muestras de la Campaña de Terreno N°1. 198
Tabla 4-20: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de muestras duplicado en los puntos de monitoreo PM5 y PM6 para la Campaña de Terreno N°2. 199
Tabla 4-21: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de los valores históricos y de las Campañas de Terreno para los puntos PM5 y PM6. 199
Tabla 4-22: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de los valores de los puntos de monitoreo de Energía Andina (2013). 200
Tabla 4-23: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de los puntos de monitoreo Ca1 Minaza y Ca2 Cuiba Jabira con los puntos AP4 y PM1 respectivamente. 200
Tabla 4-24: Datos promedio (1956-2014) para parámetros seleccionados en puntos de monitoreo. 201
Tabla 4-25: Características químicas del suelo superficial en C0. 219
Tabla 4-26: Características químicas del suelo superficial en C1. 221
Tabla 4-27: Características químicas del suelo superficial en C2. 223
Tabla 4-28: Características químicas del suelo superficial en C3. 225
Tabla 4-29: Características químicas del suelo superficial en C4. 227
Tabla 4-30: Características químicas del suelo superficial en C5. 229
Tabla 4-31: Características químicas del suelo superficial en C6. 231
Tabla 4-32: Características químicas del suelo superficial en C7. 233
Tabla 4-33: Características químicas del suelo superficial en C8. 235
Tabla 4-34: Características químicas del suelo superficial en C9. 237
Tabla 4-35: Características químicas del suelo superficial en C10. 238
Tabla 4-36: Resultados de calidad de sedimento. 240
Tabla 4-37: Especies hortícolas de la Región de Arica y Parinacota. 242
Tabla 4-38: Desarrollo de la agricultura en los valles de la Región de Arica y Parinacota. 243
Tabla 4-39: Superficie cultivada con los principales cultivos del Valle del Lluta. 244
Tabla 4-40: Calidad del agua de riego en el Valle del Lluta. 247

Tabla 4-41: Calidad del agua de riego en el Valle de Azapa. 248
Tabla 4-42: Comparación de la calidad del agua de riego en el Valle de Azapa y en el Valle del Lluta.. 249
Tabla 4-43: Tecnologías de tratamiento para el abatimiento de Boro en aguas. 251
Tabla 4-44: Estadística rellenada de caudales medios mensuales (m^3/s) en río Colpitas en Alcérreca.. 253
Tabla 4-45: Resumen comparativo de caudales medios mensuales (m^3/s) entre estudios. 254
Tabla 4-46: Estimación caudales medios mensuales (m^3/s) en río Colpitas en Alcérreca..... 257
Tabla 4-47: Rendimientos específicos medios mensuales ($L/s/km^2$) en río Colpitas en Alcérreca..... 258
Tabla 4-48: Caracterización de aforos campañas N°1, 2, y 3. 263
Tabla 4-49: Resumen de los perfiles. 268
Tabla 4-50: Número de subcuencas por subcuenca principal. 277
Tabla 4-51: Propiedades morfométricas subcuencas en Colpitas. 292
Tabla 4-52: Densidad de drenaje por subcuencas principales. 297
Tabla 4-53: Desnivel y pendiente media de cauces en subcuencas principales..... 301
Tabla 4-54: Varianza explicada y acumulada por componentes principales. PCA realizado con bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, y 8 de imagen Landsat 8 del 26 de abril, 2013. 305
Tabla 4-55: Superficie total por clase identificada a partir de clasificación no supervisada de imagen Landsat 8 del 26 de abril del 2013. 308
Tabla 4-56: Porcentaje de clases de sustrato por subcuenca en Colpitas. 311
Tabla 5-1: Caudales másicos para selección de parámetros en los puntos de monitoreo PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, y PM6, y en la estación Lluta en Alcérreca. 329
Tabla 5-2: Análisis comparativo entre los puntos de monitoreo PM2 y PM5. 329
Tabla 5-3: Análisis comparativo entre los puntos de monitoreo PM1 y PM2. 329
Tabla 5-4: Análisis molar de los componentes en la boratera. 330
Tabla 5-5: Análisis molar de los componentes del punto de monitoreo “Termal”. 330
Tabla 5-6: Resultados principales de la segunda parte de la modelación numérica 334
Tabla 5-7: Unidades Hidroestratigráficas (Depósitos Consolidados) de la Cuenca Colpitas. 353
Tabla 5-8: Unidades Hidroestratigráficas (Depósitos No Consolidados) de la Cuenca Colpitas. 355
Tabla 6-1: Comparación de tecnooogías de tratamiento de aguas 362
Tabla 6-2: Base de cálculo para Alternativa 1. 363
Tabla 6-3: Base de cálculo para Alternativa 2. 366
Tabla 6-4: Base de cálculo para Alternativa 3 368
Tabla 6-5: Base de cálculo para Alternativa 4. 371
Tabla 6-6: Comparación de alternativas según indicadores de rentabilidad 374

Tabla 6-7: Análisis legal indígena por alternativa. 392
Tabla 6-8: Indicadores y escala de valoración por ámbito de evaluación. 396
Tabla 6-9: Evaluación de alternativas. 398
Tabla 7-1: Coberturas (shapes) a entregar. 399

FIGURAS

Figura 1-1: Diagrama lógico de precedencia de actividades: etapa 1. 37

Figura 1-2: Diagrama lógico de precedencia de actividades: etapa 2. 38

Figura 1-3: Diagrama lógico de precedencia de actividades: etapa 3. 39

Figura 1-4: Diagrama lógico de precedencia de actividades: etapa 4. 40

Figura 1-5: Diagrama simplificado del sistema hídrico del río Colpitas. 43

Figura 1-6: Actuales fuentes de boratos en el mundo. 45

Figura 1-7: Principales yacimientos de boratos en Sudamérica. 45

Figura 1-8: Ulexita proveniente de Calama, Antofagasta, Chile. 46

Figura 1-9: Diagrama pC-pH a 25°C para el sistema ácido bórico con concentración total 0,1 M y fuerza iónica 0,1 M. 47

Figura 1-10: Curva de solubilidad vs temperatura de ácido bórico (H_3BO_3), bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), pentaborato ($NaB_5O_8 \cdot 5H_2O$), y metaborato ($NaBO_2 \cdot 4H_2O$) de Sodio. 48

Figura 1-11: Solubilidad vs temperatura de Ulexita expresada como g B_2O_3/100 g H_2O. 49

Figura 1-12: Fijación de Boro en suelos humedecidos a ¾ de su capacidad con disolución de ácido bórico. 50

Figura 1-13: Determinación experimental de los campos de estabilidad de isoboratos de Na y Ca como una función de Na_2O/CaO y la temperatura. 52

Figura 1-14: Modelo conceptual del origen de los fluidos hidrotermales. 54

Figura 1-15: Zonificación de la Cuenca del río Colpitas. 59

Figura 1-16: Red hídrica y afluentes principales de la Cuenca del río Colpitas. 60

Figura 1-17: Red Hídrica en sector de Borateras. 61

Figura 1-18: Bofedales de la Cuenca del río Colpitas. 64

Figura 1-19: Afloramientos termales en las borateras del río Colpitas. 66

Figura 1-20: Corrientes hídricas a través de las borateras. 66

Figura 1-21: Formaciones vegetales en las borateras del río Colpitas. 67

Figura 1-22: Borateras del río Colpitas. 69

Figura 1-23: Ubicación de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio. 71

Figura 1-24: Caudales medios mensuales y su desviación estándar: estación Colpitas en Alcérreca (1982–2011). 72

Figura 1-25: Caudal medio mensual en estación Colpitas en Alcérreca. 73

Figura 1-26: Caudal medio mensual en la estación Colpitas en Alcérreca para diferentes probabilidades de excedencia. 74

Figura 1-27: Puntos de monitoreo de Energía Andina. 78

Figura 1-28: Datos históricos de pH para la zona de confluencia Caracarani-Colpitas. 79
Figura 1-29: Datos históricos de Boro (mg/L) para la zona de confluencia Caracarani-Colpitas. 79
Figura 1-30: Diagrama Piper para antecedentes de Calidad del Agua 80
Figura 2-1: Puntos de monitoreo de calidad del agua y aforos. 87
Figura 2-2: Puntos de monitoreo de la calidad del agua de consumo. 88
Figura 2-3: Etiqueta para identificación de muestra usada por SGS. 94
Figura 2-4: Unidad de muestreo de MPS. 94
Figura 2-5: Formato E90008-2: Toma, Control y Vigilancia de Muestras Líquidas. 96
Figura 2-6: Formato E90008-2a: Ficha de Registro de Aforo (Molinete). 97
Figura 2-7: Formato E90008-2b: Ficha de Registro de Aforo (Vertedero). 98
Figura 2-8: Diagrama de Piper para una muestra ejemplo. 104
Figura 2-9: Diagrama de Stiff para una muestra ejemplo. 105
Figura 2-10: Puntos de monitoreo de suelos. 107
Figura 2-11: Disponibilidad de datos de pluviometría. 112
Figura 2-12: Dispositivo de medición mediante una configuración eléctrica (punto blanco: punto de medida; puntos negros: desplazamiento y distancia entre electrodos) 126
Figura 2-13: a, b, c, y d. Distintas combinaciones de bandas de imagen satelital Landsat 8 que resaltan distintos aspectos y componentes del territorio en el sector de borateras en la Cuenca del río Colpitas. 130
Figura 3-1: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N° 1. 138
Figura 3-2: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°2. 139
Figura 3-3: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°3. 140
Figura 3-4: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°4. 141
Figura 3-5: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°5. 142
Figura 3-6: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°6. 143
Figura 3-7: Representantes de la comunidad en la Campaña de Terreno N°2. 144
Figura 3-8: Presentación del estudio a la comunidad. 146
Figura 3-9: Registro asistencia presentación comunidad Colpitas. 147
Figura 4-1: Composición isotópica de las muestras de la cuenca del río Colpitas, LMAM, y la línea meteórica local del lago Chungará. 187
Figura 4-2: Razón entre SDTmedido vs SDTcalculado con referencias de rango de error como líneas rojas. 194
Figura 4-3: Razón entre a) cationes vs CE, y b) aniones vs CE, con referencias de rango de error como líneas rojas. 195

Figura 4-4: Razón entre SDTcalculado vs CE con referencias de rango de error como líneas rojas. 196

Figura 4-5: Razón entre SDTmedido vs CE con referencias de rango de error como líneas rojas. 197

Figura 4-6: Diagrama de Piper. 203

Figura 4-7: Variación espacial de diagramas de Stiff. 204

Figura 4-8: Variación mensual del pH en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC. 205

Figura 4-9: Variación mensual de la CE (µS/cm) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC. 206

Figura 4-10: Variación mensual de la concentración de Boro (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC. 207

Figura 4-11: Variación mensual de la concentración de Calcio (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC..... 208

Figura 4-12: Variación mensual de la concentración de Magnesio (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC..... 209

Figura 4-13: Variación mensual de la concentración de Potasio (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC..... 210

Figura 4-14: Variación mensual de la concentración de Sodio (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC..... 211

Figura 4-15: Variación mensual de la concentración de sulfato (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC..... 212

Figura 4-16: Variación mensual de la concentración de cloruro (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC..... 213

Figura 4-17: Variación mensual de la concentración de bicarbonato (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC..... 214

Figura 4-18: Variación mensual de la concentración de Arsénico (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC. 215

Figura 4-19: Variación mensual de la concentración de Cobre (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC. 216

Figura 4-20: Variación mensual de la concentración de Hierro (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC. 217

Figura 4-21: Puntos en los que se supera parámetros de referencia. 239

Figura 4-22: Serie de caudal medio anual para un año hidrológico (octubre–septiembre) en la estación fluviométrica río Colpitas en Alcérreca. 255

Figura 4-23: Serie de caudal medio mensual y caudales asociados a diferentes probabilidades de excedencia para un año hidrológico (octubre-septiembre) en la estación fluviométrica río Colpitas en Alcérreca. 256

Figura 4-24: Caudal medio mensual y diferentes probabilidades de excedencia en la Cuenca del río Colpitas. 260

Figura 4-25: Ubicación general de los perfiles geofísicos dentro de la cuenca del río Colpitas. 267

Figura 4-26: Planta general levantamiento río Colpitas. 273

Figura 4-27: Modelo digital de terreno AsterDEM V2 y Cuenca río Colpitas. 276

Figura 4-28: Subcuencas principales y subcuencas Colpitas. 279

Figura 4-29: Rangos de tamaño de subcuencas en Colpitas. 280

Figura 4-30: Altitud media por subcuencas en Colpitas. 281

Figura 4-31: Perfil topográfico Oeste–Este (A-A'). 282

Figura 4-32: Perfil Topográfico Norte–Sur (B-B'). 283

Figura 4-33: Rangos de pendiente media por subcuencas en Colpitas. 284

Figura 4-34: Valores típicos índice de Gravelius y forma de las cuencas. 285

Figura 4-35: Efecto de la forma de una cuenca sobre el hidrograma. 286

Figura 4-36: Índice de Gravelius por subcuencas en Colpitas. 287

Figura 4-37: Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión. 288

Figura 4-38: Curvas hipsométricas de Colpitas y subcuencas principales. 289

Figura 4-39: Jerarquía de red de drenaje en Cuenca de Colpitas según esquema de clasificación de Strahler. 295

Figura 4-40: Comparación entre perfiles longitudinales de cauces principales en subcuencas principales. 300
Figura 4-41: Índice de diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) calculado con imagen Landsat 8 del 26 de abril 2013. 303
Figura 4-42: Falso color compuesto (bandas 543), destaca en rojo la vegetación. Imagen Landsat 8 del 26 de abril del 2013. 304
Figura 4-43: Resultado de PCA sobre imagen Landsat 8 del 26 de abril del 2013. La imagen muestra la combinación de los tres primeros componentes que contiene más del 97% de la varianza total de la imagen. 307
Figura 4-44: Distribución de clases por subcuencas. 310
Figura 5-1: Modelo conceptual del sistema hídrico de la Cuenca del río Colpitas. 313
Figura 5-2: Unifilar de ríos y cursos de agua de la cuenca del río Colpitas. 316
Figura 5-3: Ecuación general del balance hídrico de la cuenca. 321
Figura 5-4: Diagrama simplificado de la cuenca del río Colpitas. 325
Figura 5-5: Modelo conceptual del comportamiento del Boro en el sistema de estudio 331
Figura 5-6: Etapas de la modelación 333
Figura 5-7: Concentración química en el agua de los elementos principales. 338
Figura 5-8: Diagrama causa – efecto concentración de Boro. 342
Figura 5-9: Diagrama causa – efecto concentración de Calcio. 343
Figura 5-10: Diagrama causa – efecto concentración de Potasio. 344
Figura 5-11: Diagrama causa – efecto concentración de Sodio. 345
Figura 5-12: Diagrama causa – efecto concentración de sulfato. 346
Figura 5-13: Diagrama causa – efecto concentración de cloruro. 347
Figura 5-14: Diagrama causa – efecto concentración de sólidos totales disueltos (STD). 348
Figura 5-15: Diagrama causa – efecto concentración de Arsénico. 349
Figura 5-16: Modelo Hidrogeológico Conceptual de Bloque. 358
Figura 6-1: Estructura de una plata de tratamiento tipo 362
Figura 6-2: Evaluación económica Alternativa 1 364
Figura 6-3: Evaluación económica Alternativa 2. 367
Figura 6-4: Evaluación económica Alternativa 3. 370
Figura 6-5: Evaluación económica Alternativa 4 373

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

PROFESIONALES PARTICIPANTES

En la elaboración del presente informe participaron los siguientes profesionales, según sus áreas de especialidad:

Profesional	Cargo en la Organización	Firma
Sebastián Videla Hintze	**Jefe de Asesoría/ Gerente Recusros Hídricos**	
Catalina Gacitúa Valenzuela	**Esp. Senior Ambiental/ Coordinación**	
Alejandro Gonzalez Garrido	**Esp. Prevención de Riesgos**	
Felipe Dibarrart Urzúa	**Esp. Senior Hidráulica-Fluvial**	
George Honeyman Robles	**Esp. Senior Hidráulica**	
Cristina Fernanadez Lira	**Socióloga/ Participación Ciudadana**	
Waldo Villanueva Cuevas	**Esp. Topografía**	
María F. Hernández López	**Esp. Hidrología**	
Francisco Cornejo Cornejo	**Esp. SIG**	
Carla Muñoz González	**Esp. Hidroquímica**	
José Luis Valdés Letelier	**Esp. Biótico Terrestre**	

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

RESUMEN EJECUTIVO

El estudio de los recursos hídricos de Chile es una necesidad cada vez más creciente, que encuentra su origen en las prácticas y experiencias del pasado del país y de sus habitantes. En particular, la Cuenca del río Lluta muestra una situación desmejorada en su capacidad agrícola respecto de los valles cercanos, lo que se ha atribuido, entre otros factores, a la mala calidad de sus aguas.

La Cuenca del río Lluta muestra una historia que Niemeyer, uno de los precursores de los actuales estudios hidrográficos, ilustrara con claridad en 1968 al señalar que *"(…) incrementar el área regada y mejorar las condiciones de cultivo en Lluta, distante escasos kilómetros de Arica, es pues una legítima aspiración de la población y autoridades ariqueñas. Para cumplir con tales objetivos se ha apuntado hacia varios blancos, uno de ellos, estudiar el mejoramiento de la calidad química de las aguas del Lluta, altamente contaminadas en sales y residuos (…)"*.

Según el estudio de CADE-IDEPE (2004), la agricultura del Valle del Lluta está caracterizada por una superficie total agrícola de la cuenca del Valle del Bajo Lluta de 7.606 ha. Esta área se ubica a lo largo de un tramo de 65 km entre Vilacollo y la desembocadura del río. Estas tierras agrícolas son abastecidas por el sistema de irrigación del río Lluta. Sin embargo, el área cultivada se limita normalmente a 2.784 ha, que corresponde al 37% del total de las tierras agrícolas. La superficie restante está en permanente descanso debido a la carencia de agua de riego y a la escasa capacidad de drenaje del suelo. Debido a la contaminación de origen natural de Boro en el río Lluta, los tipos de cultivo en el Valle del Bajo Lluta según superficie cultivada corresponden a maíz (1.698 ha), alfalfa (684 ha), y cierto tipo de verduras (402 ha).

Según datos del Censo Agropecuario de 2007, los principales cultivos son hortalizas, con el 46,4% de la superficie total cultivada de la región, frutales con el 27,4%, y plantas forrajeras con el 23,6%. A nivel de hortalizas, el principal producto es el tomate, que en los últimos diez años ha registrado un aumento de un 89% en la superficie cultivada. En frutales, el producto principal es olivo, que representa el 74,6% de la superficie regional cultivada, y el 14,1% de la superficie nacional (FIA, 2009).

Considerando esta visión del desarrollo agrícola y los innumerables trabajos realizados en el Valle del Lluta, el presente estudio de la Dirección General de Aguas (DGA) de la XV Región de Arica y Parinacota, definió su orientación hacia la identificación y caracterización de la calidad del agua en el Valle del río Colpitas, zona con escasos antecedentes anteriores. Cabe señalar que la subcuenca que se origina en el río Azufre fue recientemente objeto de otro estudio implementado por la misma DGA, con la participación del DICTUC. En tal sentido, el presente informe pretende ser un aporte al mejor conocimiento de la calidad del agua, y de las relaciones causa-efecto que determinan la presencia de distintos componentes, entre ellos los metales pesados, los metaloides, y los compuestos alcalinos.

La Cuenca del Colpitas se encuentra ubicada en la XV Región de Arica y Parinacota. Se encuentra entre los 17°50'32'' y los 18°05'51'' de latitud sur y entre los 69°21'12'' y los 69°37'41'' de longitud oeste. Corresponde a la zona más septentrional de la hidrografía de Chile, drenando un área total de 459,04 km².

El cauce del río Colpitas es estrecho y encajonado en algunos sectores, y sinuoso en la mayor parte de su recorrido. Hacia el norte de la subcuenca, se ubican varias quebradas que van continuamente alimentando el cauce del río Colpitas, para juntarse al río Caracarani en Coronel Alcérreca, dando origen al río Lluta.

El nacimiento del río Colpitas está ubicado sobre una franja volcánica que cambia desde una dirección NS que se extiende a lo largo del país, a una franja con alineamiento diagonal de dirección NW-SE, reflejo de la tectónica de placas plasmada a su vez en la forma de la línea de costa. Esta franja volcánica diagonal se extiende desde los Nevados de Payachatas (volcanes activos Parinacota y Pomerape) por el SE, hasta el volcán Tacora (volcán activo en territorio chileno, colindante con Perú) por el NW, pasando por las serranías de Ancolacane, a cuyos pies meridionales se ubican las borateras de Colpitas. Inmediatamente al sur de esta localidad se ubican los Nevados de Putre y el volcán Tarapacá.

El presente documento corresponde al informe final del proyecto "Estudio Caracterización Hidrogeológica de la Cuenca del Río Colpitas", adjudicado a AMEC por la Dirección General de Aguas (DGA) de la XV Región de Arica y Parinacota. Este estudio se inició en marzo de 2013, con un plazo de duración de 420 días. El estudio tuvo por objeto generar antecedentes técnicos que permitan disponer de mejor información de la calidad del agua del Colpitas, establecer causas de los contaminantes naturales, definir el balance hidroquímico, y recomendar posibles acciones que permitan disminuir los altos niveles de contaminantes en el agua de riego y en el suelo.

Los objetivos del estudio se centraron en la caracterización hidrológica, hidroquímica, y geoquímica de la Cuenca del río Colpitas. Esta información permitió identificar y conocer las fuentes y procesos que aportan elementos químicos al agua del río Colpitas, en particular el Boro, los que afectan su calidad y, por consiguiente, condicionan el uso del recurso hídrico en el riego agrícola del Valle del río Lluta.

La realización de este proyecto viene a llenar un espacio de información que no estaba disponible sobre el Valle del Colpitas, y en particular sobre la calidad del agua de esta cuenca. Como consecuencia de las seis Campañas de Terreno realizadas a lo largo de un año, actualmente se conoce la calidad del agua, el origen de sus componentes químicos, y las fuentes de agua de mejor calidad, junto con el balance del sistema hídrico. Además el proyecto permitió identificar y caracterizar esta cuenca usando modelos de elevación digital, estudios de química del suelo, mediciones geofísicas, y topografía en sectores seleccionados.

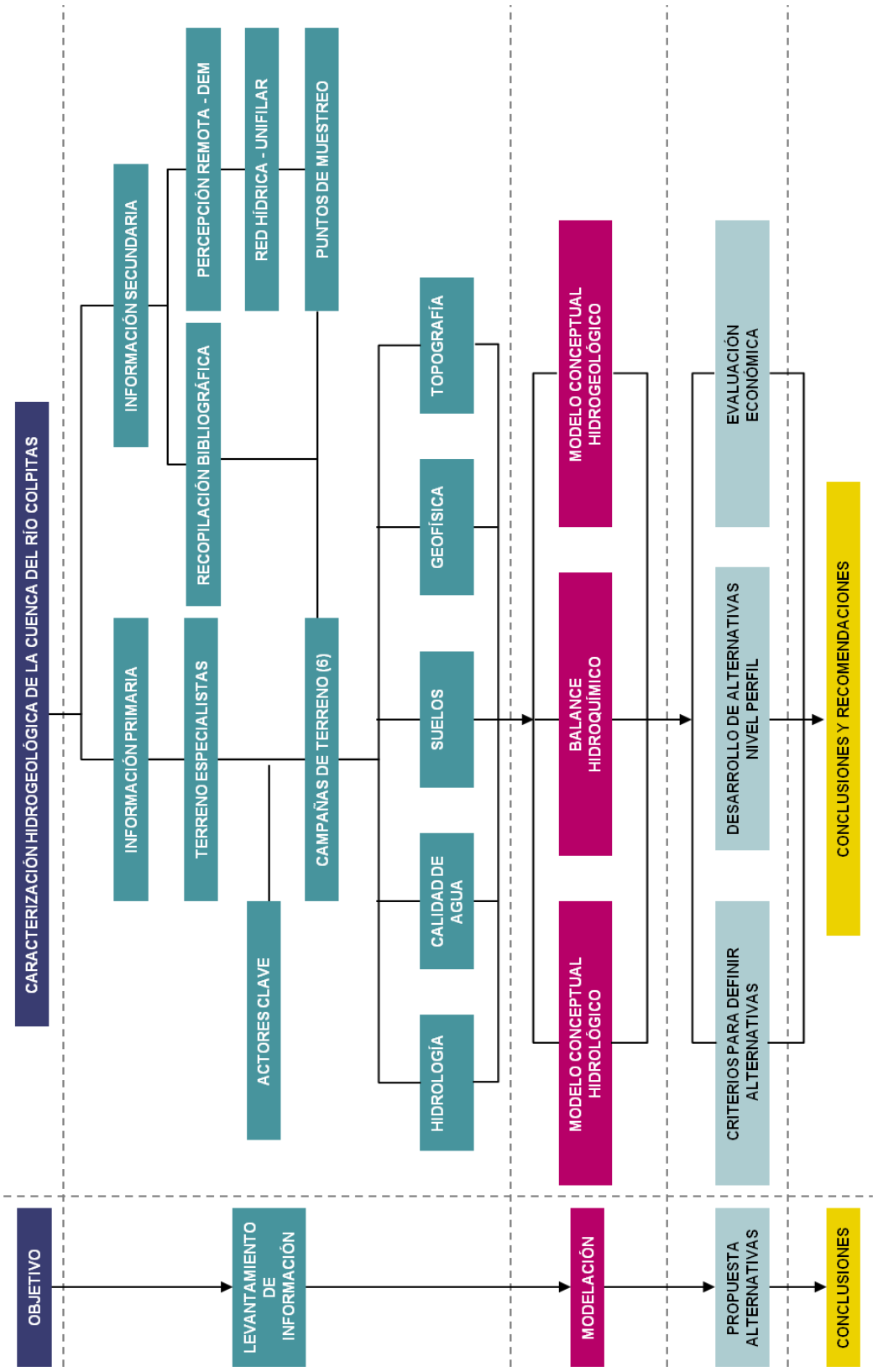
El informe se encuentra estructurado en nueve secciones principales más los anexos. Las primeras secciones se refieren a la introducción junto a los objetivos y alcances del trabajo, mientras que luego se introducen seis grandes capítulos dedicados sucesivamente a la metodología y plan de trabajo, monitoreo y actividades de terreno, presentación de resultados del proyecto, modelación, y solución de alternativas. Se termina entregando conclusiones y recomendaciones.

El estudio se inició con una revisión bibliográfica, en especial orientada a definir un marco de referencia desde donde parte el trabajo planteado. Para ello se estableció un diagnóstico preliminar y se procedió a identificar el problema planteado. En esta forma se definió un concepto del estudio y se planteó una base de referencia para el estudio del sistema hídrico de esta subcuenca del Lluta.

A partir del análisis anterior, se definieron metodologías y plan de trabajo para abordar los aspectos principales que permitieron caracterizar la calidad del agua y del medioambiente de la subcuenca del Colpitas. Este enfoque privilegia una visión científica y técnica de la realidad, resaltando la importancia de entender las relaciones existentes que determinan los procesos naturales de contaminación de las aguas. Por ello se definieron y plantearon metodologías para la caracterización de la calidad del agua, estudio del suelo, hidrología, condiciones agroclimáticas, y otras variables relevantes del medio físico.

A modo de presentación esquemática de la organización del estudio, la figura siguiente muestra cómo se usó un orden lógico que permitió cumplir con los objetivos del proyecto. Este mismo orden se muestra en este informe final, teniendo como resultados principales de cada una de las áreas del conocimiento los siguientes: para el área de hidrología se logró la caracterización de los aforos para cada uno de los puntos de monitoreo. Para el área de calidad de agua, se determinó que todas las aguas del río Colpitas están influenciadas por la zona de las borateras, y que todas las aguas abajo son del tipo cloruradas-sódicas con concentraciones de Boro por sobre los 60 mg/L; aguas de otras quebradas tienen distintos orígenes y mejores calidades. Para el área de suelos y sedimentos se determinó que en todas las calicatas realizadas se superó al menos un parámetro dentro de los límites permitidos, siendo los más relevantes Boro y Arsénico.

El área de geofísica agregó de forma no concluyente que las aguas del sector de borateras tienen una alta influencia de aguas subterráneas, y no así aguas de otros sectores. La validación de esta información solo es posible con la medición de niveles de agua subterránea en pozos, aún inexistentes en la zona. En el área de la topografía se logró caracterizar de manera preliminar las cotas del área de las borateras.


OBJETIVO
LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN
MODELACIÓN
PROPUESTA ALTERNATIVAS
CONCLUSIONES
CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS
INFORMACIÓN SECUNDARIA
INFORMACIÓN PRIMARIA
RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA
TERRENO ESPECIALISTAS
ACTORES CLAVE
CAMPAÑAS DE TERRENO (6)
PERCEPCIÓN REMOTA - DEM
RED HÍDRICA - UNIFILAR
PUNTOS DE MUESTREO
TOPOGRAFÍA
GEOFÍSICA
SUELOS
CALIDAD DE AGUA
HIDROLOGÍA
MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO
BALANCE HIDROQUÍMICO
MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO
EVALUACIÓN ECONÓMICA
DESARROLLO DE ALTERNATIVAS NIVEL PERFIL
CRITERIOS PARA DEFINIR ALTERNATIVAS
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como consecuencia de la escasa información que existía al inicio del estudio, se definió la necesidad de realizar un modelo de elevación digital apoyado por información de percepción remota, principalmente del satélite Landsat 8 lanzado por NASA en febrero de 2013. Los sensores montados sobre Landsat 8 son el OLI (Operational Land Imager) y el TIRS (Thermal Infrared Sensor). Este satélite orbita sobre la tierra a una altura de 705 km, con una capacidad de revisita de un mismo lugar de cada 16 días.

Mediante el uso del SIG GRASS (grass.osgeo.org) y su módulo Watershed se procesó el AsterDEM para identificar subcuencas y red de drenaje en forma automática. De este procesamiento se obtuvieron un total de 59 subcuencas, cuya superficie varía entre los 0,1 a 27,5 km^2, siendo mayoritario el rango que va desde los 5,6 a 11 km^2. Asimismo se determinaron las altitudes de esas subcuencas, las que varían entre 3.818 a 5.001 m.s.n.m.

Para el estudio se procedió a agrupar estas subcuencas según sector:

- Sector Colpitas Alto: con una superficie de 23,95 km^2, este sector corresponde a la zona alta de la Cuenca del Colpitas después de su nacimiento e incluye sus afluentes superiores que no pasan por zonas identificables como borateras.

- Sector Colpitas en Borateras: con una superficie de 100,11 km^2, este sector se ubica inmediatamente aguas abajo del Sector Colpitas Alto y corresponde a la cuenca del río Colpitas, donde se manifiestan los afloramientos de Boro. Incluye también aquellos afluentes del río Colpitas, que confluyen en el sector de las borateras, o bien que en su trazado pasan por alguna.

- Sector Colpitas Medio: con una superficie de 88,78 km^2, este sector se ubica inmediatamente aguas abajo del Sector Colpitas en Borateras y corresponde a la cuenca intermedia de este cauce. Abarca aproximadamente desde el cruce de la ruta A-125 sobre el río Colpitas, hasta su confluencia con la Quebrada Allanes. Incluye la cuenca hidrográfica de la Quebrada Iquilla, el principal afluente del río Colpitas en este sector y el segundo en importancia de toda la cuenca.

- Sector Quebrada Allanes: con una superficie de 233,43 km^2, este sector corresponde a la cuenca hidrográfica de la Quebrada Allanes, el afluente principal del río Colpitas en todo su desarrollo, hasta el punto de confluencia entre ambos cauces.

- Sector Colpitas Bajo: con una superficie de 12,75 km^2, este sector corresponde a la cuenca hidrográfica del río Colpitas entre su punto de confluencia con la Quebrada Allanes y su punto de confluencia con el río Lluta.

Con esta definición, el sistema hídrico del estudio corresponde a la subcuenca del Colpitas, formada por las cinco zonas antes mencionadas. La identificación y

caracterización de procesos y corrientes, con sus respectivas transformaciones, flujos, y concentraciones fue definida como parte esencial del trabajo realizado.

En la revisión bibliográfica se hizo hincapié en el estudio del Boro y su condición mineral de origen natural. En la naturaleza, el Boro se encuentra como boratos simples o mezclados con elementos o compuestos como Sodio, Calcio, Magnesio, silicatos, Hierro, y cloruros (Sassolita, Bórax, Kernita, Colemanita, Inyoita, Priceita, Ulexita, Probertita, Ascharita, Inderita, Pinnoita, Hidroboracita, Datolita, Ludwigita, y Boracita).

En particular, la Ulexita corresponde a un compuesto que responde a la siguiente reacción principal:

$$\underbrace{Na_2{\cdot}2CaO{\cdot}5B_2O_3{\cdot}16H_2O_{(s)}}_{\text{Ulexita}} + 3H_2SO_4 \rightarrow 2Na^{+}_{(ac)} + 2CaSO_4{\cdot}2H_2O_{(s)} + SO^{-2}_{4(ac)} + \underbrace{10H_3BO_{3(ac)}}_{\text{ácido bórico}}$$

El ácido bórico acuoso y la solubilidad de otros compuestos de Boro son dependientes del pH; el ácido bórico posee dos constantes de acidez, que a 20 °C tienen valores pK_{a1} = 9,27 y pK_{a2} > 14.

El sector de las borateras se encuentra ubicado a 2 km al este de la localidad de Colpitas, en las coordenadas 8.015.000 N y 454.000 E, a una altitud media de 4.150 m.s.n.m. Este sector corresponde a depósitos evaporíticos de donde procede la mayor fuente de Boro, los cuales están relacionados directamente con volcanes en actividad o con campos geotérmicos. Los depósitos evaporíticos son depósitos sedimentarios que se forman por la cristalización de sales disueltas, proceso que es favorecido por condiciones climáticas áridas extremas de alta evaporación, y por el aporte de agua dulce.

Las Campañas de Terreno se distribuyeron temporalmente en el año, para registrar de mejor manera un posible comportamiento estacional de la calidad del agua. Se muestreó agua superficial y agua lluvia. Los puntos de monitoreo se seleccionaron de acuerdo con diferentes aspectos tales como la accesibilidad, ubicación de las borateras, e inspección inicial en terreno. Utilizando el modelo de elevación digital y la definición de subcuencas, se realizó una preselección de puntos representativos a lo largo de la caja del río, los que posteriormente fueron ratificados con inspección de terreno.

Para determinar la calidad del agua del agua superficial y agua lluvia, se tomó como referencia los requisitos de calidad del agua para riego de la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). Para determinar la calidad del agua de consumo de los lugareños, se usó como referencia la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). Los parámetros in situ correspondieron a pH (u.a.), temperatura (°C), Conductividad Específica (CE, µmhos/cm), Oxígeno Disuelto (OD, mg/L), Turbiedad (NTU), y potencial redox (ORP, mV).

Para caracterizar someramente el origen del agua superficial, se analizaron isótopos de Oxígeno-18 (^{18}O), Deuterio (^{2}H), y Tritio (^{3}H). Los valores relativos de la relación isotópica de los diferentes tipos de aguas se expresan en forma de desviaciones isotópicas (δ) en relación a la referencia VSMOW (del inglés, Vienna-Standard Mean Ocean Water). Como referencia comparativa, se realiza el supuesto que la mayor parte de las precipitaciones que tienen lugar en nuestro planeta se sitúan alrededor de la Línea Mundial de las Aguas Meteóricas (LMAM) definida por Craig (1961) en la ecuación:

$$\delta D‰ = 8\ \delta^{18}O‰ + 10$$

Así, las aguas que han experimentado evaporación se sitúan a la derecha y por debajo de la LMAM.

El muestreo de aguas fue realizado por personal técnico del laboratorio SGS Chile Ltda. El procedimiento de muestreo se realizó en aguas superficiales directamente desde el flujo de agua, y en agua lluvia con una unidad de muestreo de MPS modificada. Los procedimientos de técnicas de muestreo y preservación de las muestras se basan en las normas NCh 441/2.Of96 (INN, 1996a), NCh 411/6.Of98 (INN, 1998), y NCh 411/3.Of96 (INN, 1996b).

Siguiendo los procedimientos de aseguramiento de calidad que AMEC tiene para trabajos de esta naturaleza, los resultados obtenidos fueron verificados y evaluados usando balance iónico, análisis estadístico, y criterio experto. Se realizaron diagramas hidroquímicos (Piper y Stiff) para identificar el origen y características del agua. Asimismo se realizó modelación hidroquímica lo que permite identificar la composición probable de las aguas. La modelación geoquímica numérica del dominio de la cuenca se realizó con el programa PHREEQC for Windows.

El análisis realizado consideró también las características físicas del suelo en profundidad, especialmente a la clase textural y a la conformación de horizontes del suelo mineral y orgánico según sea el caso, ya que por la ubicación y el origen de los suelos, se definió que, probablemente, la fracción mineral estaría constituida por texturas gruesas, poco reactivas, lo que implica fácil lavado de sales (entre otros elementos) que puedan acumularse durante períodos de baja precipitación. Se realizaron análisis en 10 calicatas de la subcuenca del río Colpitas.

La descripción de cada perfil del suelo se realizó con el apoyo de Tabla Munsell, huincha de medir, cámara fotográfica, cuchillo; adaptando además parte del método descriptivo indicado en el Soil Survey Manual (Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture). Dado el objetivo de la caracterización de los suelos, las muestras destinadas a laboratorio fueron de carácter superficial, recolectadas en el rango de 0 a 20 cm de profundidad. El análisis de la granulometría se realizó en laboratorio acreditado Testcontrol Ltda., en la ciudad de Arica.

Las actividades de terreno incluyeron:

- 6 campañas de monitoreo de calidad de agua.
- 4 campañas hidrológicas.
- 10 calicatas y análisis físico y químico de sedimentos.
- Perfiles geofísicos.
- Topografía en secciones definidas.
- 2 talleres de difusión: provincias Arica y Parinacota.

Para iniciar las Campañas de Terreno se optó por realizar una primera visita de reconocimiento general del Colpitas, realizada entre los días 20 y 21 de febrero de 2013, donde se procedió a levantar información que luego fue procesada para definir las campañas de monitoreo, tal como muestra la tabla a continuación:

Campaña	Actividad programada/realizada						
	Muestreo hidroquímico	Muestreo isótopos	Aforo	Muestreo sedimentos	Muestreo suelos	Geofísica	Topografía
1	✓	✓	✓				
2	✓		✓	✓			
3	✓		✓		✓		
4	✓	✓	✓				
5	✓					✓	
6	✓						✓

Considerando la necesidad de realizar trabajos en la subcuenca se definió un proceso de acuerdo con la comunidad local, que se inició el día 11 de junio de 2013, con una presentación del estudio a los miembros de la comunidad Colpitas, en la Sede Vecinal de dicha localidad.

La finalidad del taller se centró en presentar a AMEC como empresa encargada por la DGA para la ejecución de un estudio con base geográfica en la Cuenca del río Colpitas. Asimismo se explicó a la comunidad que se realizarían 6 Campañas de Terreno, dentro de un plazo estimado de 12 meses.

Los sedimentos muestreados fueron analizados bajo los mismos parámetros de la calidad del suelo debido a la falta de normativa que regule la calidad de los mismos. La tabla siguiente muestra los resultados de la calidad del sedimento, donde destaca la

nula presencia de Boro, lo que se ratifica por su alta solubilidad y baja retención de sólidos.

Parámetro	Unidad	Limite de Detección	PM1	PM2	PM3	PM5	Concentración de referencia	
			30/05/13	30/05/13	30/05/13	30/05/13	Sin problema	Severo
Aluminio	mg/kg	0,5	1.058	1.062	1.334	1.329		
Arsénico	mg/kg	0,1	13,0	184	6,82	110	<15	>50
Azufre	mg/kg	10	<10	21	<10	23		
Boro	mg/kg	0,1	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,75	>3,0
Calcio	mg/kg	0,1	1.175	2.076	2.022	1.100		
Cloruro	mg/kg	10	16	263	35	180	<350	>350
Hierro	mg/kg	0,1	6.260	3.538	7.358	4.266		
Manganeso	mg/kg	0,1	185	157	148	256		
Plomo	mg/kg	0,1	4,00	2,32	2,14	4,92		
Silicio	mg/kg	0,1	14,4	21,0	17,3	29,0		
Sodio	mg/kg	0,1	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<115	>700

Se procedió a realizar un balance hídrico de la subcuenca del Colpitas para lo cual se consideraron los siguientes elementos de información:

- La hidrología existente, previamente estudiada a partir de datos de la estación de la DGA y mediante estimaciones de los aportes de los distintos afluentes del río Colpitas.

- La medición de aforos realizados en las Campañas de Terreno en los puntos de monitoreo seleccionados en afluentes principales del sistema hídrico.

- El modelo de elevación digital que permitió construir un diagrama unifilar del sistema hídrico, donde se identifica la estructura que da origen al caudal del río Colpitas. Como zona de estudio se incluyó desde el nacimiento del río Colpitas hasta su confluencia con el río Lluta.

- Una ecuación de balance simplificada que está definida por la siguiente expresión:

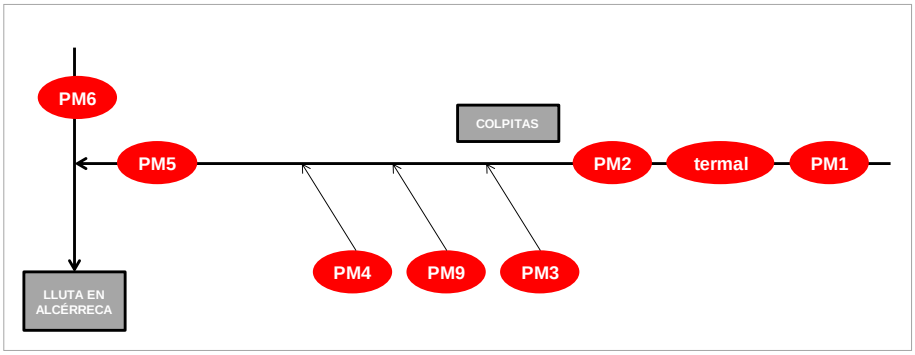
$$\text{Salidas} - \text{Entradas} = 0$$

$$ET + Ev + Go + So - P - Si - AS - \text{Agua aportante} = 0$$

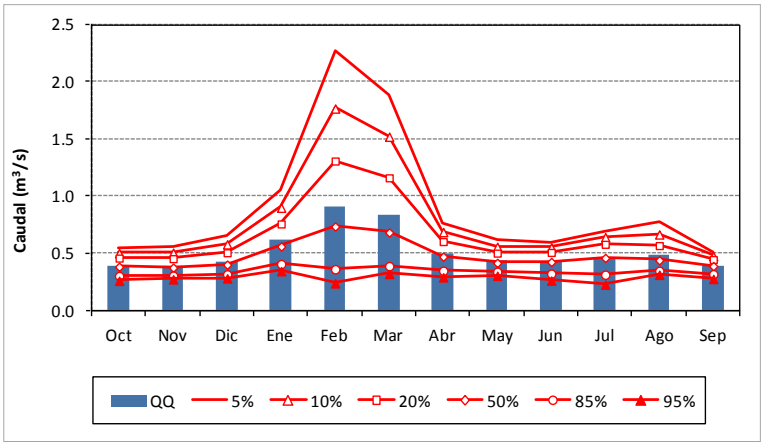
Donde ET es la evapotranspiración, Ev es la evaporación, Go corresponde a agua subterránea, So corresponde a agua superficial que sale, P es la precipitación, Si corresponde a la escorrentía superficial, y AS es afloramiento de agua subterránea.

Cada uno de estos componentes fue estimado mediante memorias de cálculo basadas en teorías reconocidas de los respectivos procesos y en datos medidos a través de los monitoreos realizados.

Un diagrama simplificado del sistema donde se plantea el balance hidroquímico es el siguiente:



Por su parte, se definió la hidrología del valle en base a la información existente y las estimaciones por áreas aportantes, lo que permitió disponer de caudales medios mensuales y series hidrológicas. Un diagrama del caudal medio mensual y caudales asociados a diferentes probabilidades de excedencia para un año hidrológico (octubre-septiembre) en la estación fluviométrica Colpitas en Alcérreca se muestra en la siguiente figura:



La calidad del agua del río Colpitas está caracterizada por un pH neutro-alcalino, y altas concentraciones de sales, en especial cloruro, Boro, y Arsénico.

El Boro es un elemento que proviene principalmente de la disolución de sales de Ulexita, desde los campos geotermales en la cuenca del río Colpitas.

En la salida de las borateras, el agua del río Colpitas tiene altas concentraciones de Boro y Arsénico, las que disminuyen a lo largo del río por fenómenos de co-precipitación, y por el efecto de disolución que producen las quebradas que aportan aguas de mejor calidad.

La tabla siguiente contiene la caracterización química del agua en valores promedios de los cuatro sectores más representativos de la cuenca:

Lugar	pH	CE mS/cm	Cloruro mg/L	Boro mg/L	Arsénico mg/L	Calcio mg/L	Potasio mg/L	Sodio mg/L	SDT mg/L	Sulfato mg/L
Colpitas arriba de borateras (PM1)	8,3	0,3	7,2	0,7	0,03	29,8	5,4	21,7	275	100,0
Colpitas debajo de borateras (PM2)	7,5	4,7	1.307	60,6	1,49	116,2	66,8	751,0	2809	341,8
Colpitas en Alcérreca (PM5)	8,1	2,3	538	22,1	0,51	76,7	53,4	312,0	1437	241,8
Quebrada Allane (PM4)	8,7	0,9	157	7,0	0,17	34,2	5,7	143,1	538	55,0

La química del agua muestra variaciones de concentración significativas que pueden explicarse en relación a la disolución de la Ulexita en el proceso geotérmico de las borateras. A continuación se analizan cada uno de estos parámetros.

- Boro: Los resultados analíticos de la medición de este parámetro muestran que todas las corrientes tienen algún grado de concentración de Boro, incluido en el río Lluta y las corrientes que conforman la red hídrica de Colpitas. El rango de resultados es bastante amplio, cubriendo desde valores por debajo del límite de detección hasta más de 60 mg/L. La corriente que muestra este alto nivel de concentración está identificada a través del punto de muestreo N°2 (PM2), que corresponde a la salida de la boratera, lo que ratifica la hipótesis que este lugar es la fuente principal de aporte de este elemento, siendo generada por la afluencia de aguas subterráneas termales.

- Calcio: Este elemento está presente en toda la Cuenca del Colpitas y adicionalmente en el río Lluta, en concentraciones similares, lo que se explica por la base geológica. El Calcio está formando parte de diversas formas minerales que se lixivian y aumentan las concentraciones en los recursos hídricos de la cuenca. Pese a lo anterior, existe una mayor concentración en PM2, lo que se explica porque forma parte de la Ulexita.

- Potasio: En forma similar al Calcio se observa que este elemento está en toda la cuenca en cantidades cercanas a 5 mg/L, siendo mayor su contenido en el PM2

como consecuencia de las borateras. En el punto 5 (PM5) la concentración se mantiene alta (rango 50 a 60 mg/L), lo que se atribuye al efecto aguas abajo del PM2.

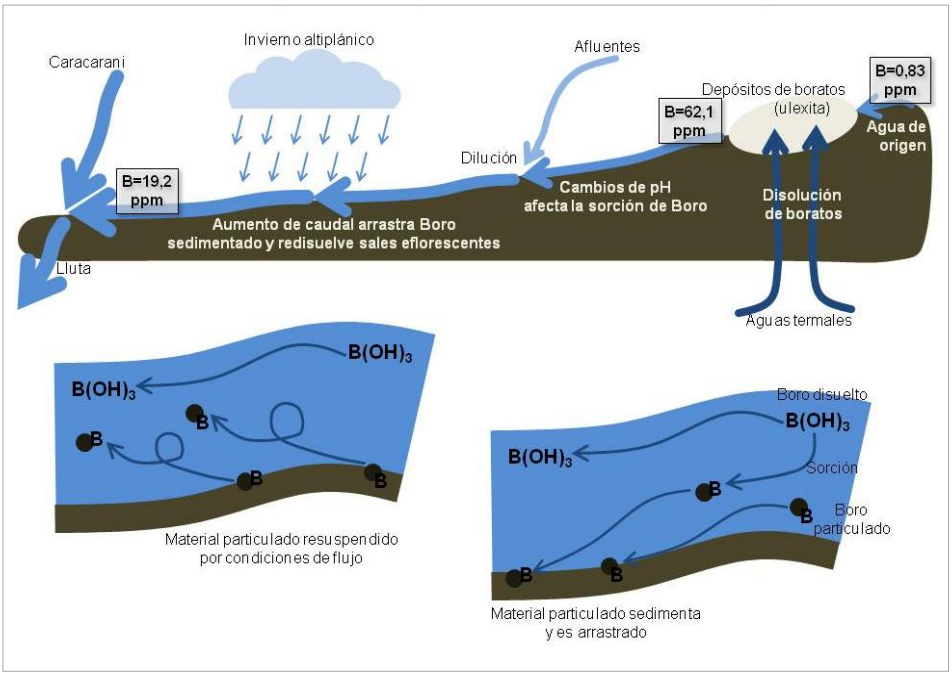
- Sodio: Es un elemento principal que forma parte de varios compuestos minerales presentes en la cuenca. Todos los valores en los distintos puntos de medición son relativamente altos, siendo su rango desde 20 hasta 800 mg/L. Los valores más altos se encuentran en la salida de las borateras, lo que como otros elementos, es inmediata consecuencia de que este elemento forma parte estructural de la Ulexita.

- Sulfato (SO_4): Las concentraciones de sulfato de Colpitas son siempre inferiores a las que se registran en el río Lluta, lo que es clara consecuencia del efecto del río Azufre. El rango de valores en Colpitas es desde 50 hasta 350 mg/L, este último corresponde a PM2, mostrando la importancia del efecto de las borateras.

- Cloruros (Cl^-): El valor máximo corresponde a PM2 alcanzando 1.307 mg/L, lo que se diferencia nítidamente del resto de los puntos de muestreo. Este parámetro forma parte de la Ulexita.

- Sólidos Totales Disueltos: Los STD que se observan corresponden a los iones que se han traspasado al agua en las borateras, producto de la lixiviación a alta temperatura. Ellos resumen todo el fenómeno de solubilidad iónica. Los altos valores en PM2 muestran que el efecto en la calidad de aguas de las borateras es muy significativo, lo que también se ve expresado en PM5.

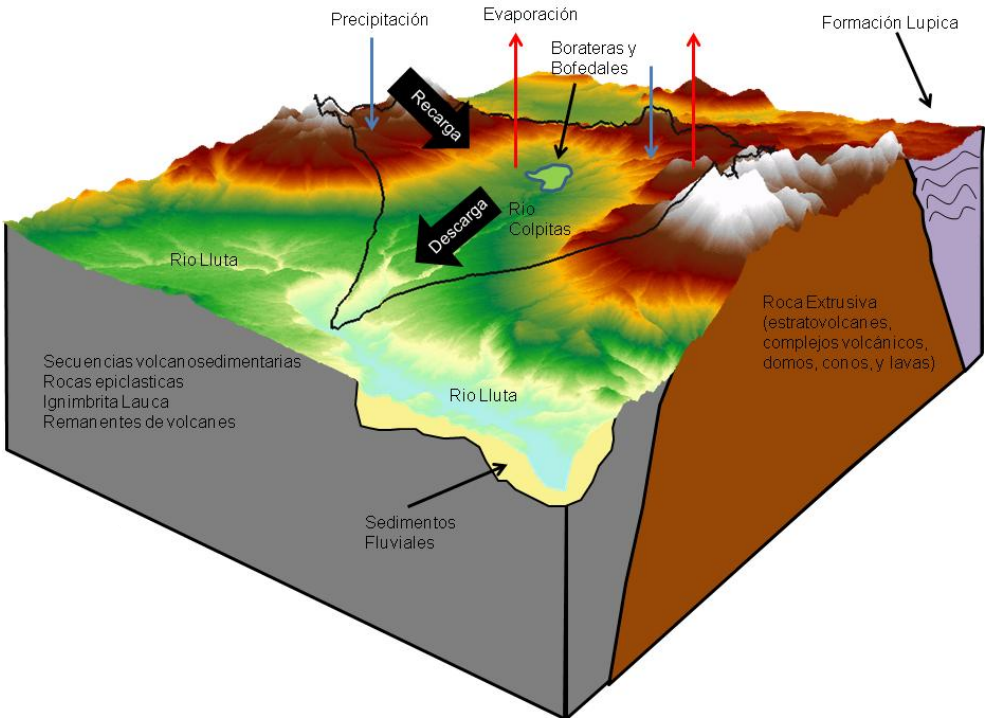
Un diagrama de la situación química, expresada en el Boro, se muestra en la figura siguiente:



En este modelo conceptual se observa con una flecha azul, que el agua de origen pasa por los depósitos de boratos o borateras, que tienen principalmente Ulexita. Estas borateras se ven afectadas por aguas termales (flechas azul obscuro), y que aportan caudal al río Colpitas. Aguas abajo de las borateras, el Boro puede sufrir sorción, que se ve afectada por los cambios de pH, además se observa el aporte de otros afluentes que generan dilución en el río, aumentando el caudal.

Se pueden observar otros aportes, como la lluvia del invierno altiplánico que si bien es marginal en cuanto a su aporte en caudal, químicamente es un agua limpia que provoca dilución en las concentraciones. En el aumento de caudal pueden ocurrir una o ambas de las situaciones descritas en las imágenes inferiores; material particulado desde el lecho del río puede ser resuspendido, generando que el Boro sea incorporado a la columna de agua (como sólido suspendido), o puede ocurrir que en el material suspendido ocurran fenómenos de sorción del Boro, y que sedimente en el lecho del río y sea arrastrado por el mismo.

La geología de la región de la Cuenca del Colpitas se caracteriza por varias unidades de lecho rocoso sobrepuesto en algunas áreas por sedimentos superficiales no consolidados que, en algunos casos, forman acuíferos. Las unidades hidroestratigráficas corresponden en general con estos tipos litológicos. La siguiente figura corresponde a un diagrama de bloque hidrogeológico conceptual que muestra una porción de la zona de la Cuenca Colpitas.



Según los resultados obtenidos la concentración de los distintos elementos analizados no responde a un patrón de distribución homogéneo. Se evidencia el efecto de las borateras como origen de elementos que se presentan en altas concentraciones, en algunos casos, concentraciones extremas.

A partir de la visión geográfica, química, y conceptual, las Campañas de Terreno permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

- El Boro proviene esencialmente de las borateras localizadas en la parte alta del Colpitas, traspasado al medio líquido a través de procesos de lixiviación que se ven acelerados por el nivel termal de las aguas. Esta hipótesis se basa en el hecho reconocido de que la solubilidad del Boro aumenta con la temperatura de una forma creciente, no lineal, que favorece su disolución.

- Las aguas provenientes de la Quebrada Allane no tienen el mismo nivel de concentración de Boro, debido a que las condiciones del medio, específicamente el suelo y la roca, no son similares al sitio de las borateras.

- La contaminación por Boro en el río Lluta está condicionada por la situación del río Colpitas, cuya influencia es decisiva en la calidad de sus aguas.

El proyecto ha generado información sobre concentración de los elementos químicos principales en el agua y los sedimentos del río, sus fuentes primarias de origen y los procesos que determinan la incorporación de estos elementos al agua. Asimismo, se

ha determinado la concentración de elementos químicos en el suelo y la caracterización de los sistemas geológicos y geofísico.

A modo de resultado, se generó un modelo digital de elevación en base a imágenes satelitales, se modeló la red hídrica mediante diagrama unifilar, y se realizó la modelación conceptual hidroquímica e hidrogeológica.

La aplicación de este enfoque obliga a considerar los proyectos, programas y políticas desarrollados en la actualidad en la cuenca, así como aquellos propuestos para el futuro. En este sentido, este informe espera contribuir al análisis estratégico de la gestión integrada del recurso hídrico.

Si bien, la condición química del agua es determinada en la parte superior de la cuenca, los usos dados aguas abajo definen requerimientos de calidad, así como también efectos o alteraciones de las calidades existentes generadas por el efecto de sus efluentes.

Finalmente se considera que se ha cumplido el objetivo de que el estudio aporte información adicional a la existente basada en mediciones y monitoreo estacionales a lo largo de un año de trabajo experimental y de terreno, con un enfoque eminentemente multidisciplinario que permitiese un levantamiento integral del medio físico de la zona de estudio.

Asimismo, se dispone de resultados que muestran la distribución espacial de los componentes químicos y de los flujos de agua, todo ello enmarcado en una visión conceptual de las relaciones causa efecto y de la conformación estructural del valle de Colpitas, lo que le otorga una orientación científica y técnica a partir de la cual se puedan establecer conclusiones válidas para otros trabajos futuros.

El estudio contó en todo momento con la colaboración de la población indígena como asimismo de autoridades de la DGA, y otros organismos públicos, todos los cuales debiesen verse beneficiados al disponer de información nueva que facilita la toma de decisiones y la generación de nuevas iniciativas en este valle.

Como recomendaciones finales se han señalado la conveniencia de hacer estudios geofísicos en toda la cuenca del Lluta, logrando un mejor nivel de conocimiento del sistema hídrico, incluyendo sus aguas subterráneas. Asimismo se ha concluido que el estudio cubre gran parte de los requerimientos de información que permiten caracterizar la subcuenca del Colpitas, pero que igualmente e requerirá abarcar un espacio de tiempo mayor, y en lo posible mantener monitoreo permanentes de variables físico químicas involucradas en la calidad del agua. Un estudio integrado de la cuenca del Lluta puede ser una herramienta que facilite la toma de decisiones públicas y privadas.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

1.0 INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos en la zona norte de nuestro país constituyen una limitante para el desarrollo social y económico. En periodos secos o de bajas precipitaciones se observa una escasez general de agua y un descenso sostenidos de niveles en acuíferos, sumado al consecuente empeoramiento de la calidad del recurso hídrico. En condición húmeda, en cambio, se anteponen los daños directos e indirectos a la propiedad pública y privada producto de las crecidas sin control.

Esta problemática se presenta en la Cuenca del río Lluta, donde históricamente la calidad de sus aguas ha permitido una utilización de este recurso restringida sólo a ciertos cultivos tradicionales, limitando su uso como fuente de agua para el consumo humano.

La calidad de las aguas muestra una gran variedad de elementos y compuestos químicos, tales como Boro y Arsénico, en concentraciones relativamente altas en comparación con las aguas de otras cuencas de mayor productividad y uso agrícola. El Boro en particular presentaría problemas para la salud de las personas, además de tratarse de un elemento fitotóxico, no siempre bien estudiado, que es citado como uno de los elementos que limita la actividad agrícola del valle, condicionándola hacia cultivos de baja rentabilidad.

Todo indica que en el futuro cercano, esta situación podría verse agravada debido a problemas relacionados con la calidad química del recurso, originados por la sobre explotación de los acuíferos o por fenómenos de contaminación antrópica.

Como consecuencia de la situación anterior, el patrimonio medioambiental vinculado a los recursos hídricos viene sufriendo un menoscabo sostenido en la última década, debido principalmente a la explotación intensiva de los acuíferos, pero también como consecuencia de drenajes de ácidos o con cargas importantes de agroquímicos, fenómeno que hasta ahora no ha podido ser adecuadamente pesquisado e investigado.

Reconocer y estudiar la interdependencia que existe entre los usos y los impactos es fundamental y debería ser considerada en cualquier evaluación que pretenda generar un manejo sustentable de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la Región de Arica y Parinacota.

Considerando que el río Lluta presenta altos niveles de Boro, Arsénico, y otros elementos como producto de fuentes naturales localizadas en la parte alta de la cuenca, en particular queda por estudiar la Cuenca del río Colpitas, donde existen borateras, que aportan altos niveles de Boro, Calcio, cloruros, y otros elementos al agua y finalmente al suelo del Valle del Lluta. La disminución del contenido químico en el agua de riego es una alternativa que hoy es técnicamente factible, pero se requiere

avanzar en el conocimiento de los procesos, aportes hídricos y ubicación de estas fuentes contaminantes con el objeto de tomar medidas o construir obras que permitan la disminución de este.

Cabe citar un texto de Niemeyer (1968) que justifica el estudio de la Cuenca del Colpitas, al señalar: *"(…) Es indispensable abocarse a un reconocimiento detenido de la Qda. de Allane y del río Colpitas, examinando sus lechos y los tributarios y muestreando y analizando la calidad de las aguas de todas las vertientes que los alimentan (…)"*.

1.1 Diagnostico y Definición del Problema

En el Valle del Lluta, predominan condiciones de suelos y aguas con alta concentración salina y presencia de toxicidad por iones específicos, como Sodio, cloruros, y Boro, entre otros. Esto ha afectado el espectro de cultivos y ha determinado que el desarrollo de los procesos y actividades agrícolas que allí realizan los productores se efectúe con rentabilidades muy bajas, en que los estrechos márgenes de utilidad afectan el interés por incorporar nuevas tecnologías (Doussoulin & Quezada, 2008).

El estudio consideró una orientación hacia la identificación y caracterización de las fuentes de Boro y otros elementos asociados por su relativa importancia en la calidad de aguas de la Cuenca del Colpitas. Por ello se hace especial mención al Boro como elemento característico de estas aguas.

El Boro es un elemento esencial en la nutrición mineral de las plantas. Es absorbido por las raíces como acido bórico neutro y también como borato. La absorción se produce por tres mecanismos, difusión pasiva, transporte facilitado a través de canales proteicos, y transporte activo por proteínas específicas (Brown et al., 2002; Dannel et al., 2002; Lauchili, 2002). Forma parte de la pared celular y complejos estables en la membrana plasmática, y estimula la germinación del polen y la elongación del tubo polínico (Kosmas & Moustakas, 1990). En la mayoría de los cultivos los síntomas de toxicidad se presentan cuando la concentración de Boro en las hojas supera 250 a 300 mg/kg (peso seco) (Ayres & Westcot, 1989).

El contenido de Boro en los cultivos, varía con las especies, la edad, y los órganos analizados, de tal manera que los síntomas de toxicidad aparecerán por encima de 200 µg/mL. Estos síntomas coinciden en la mayoría de los cultivos con necrosis progresiva de las hojas que comienza por un amarillamiento de los bordes de las hojas, continua entre los nervios laterales hacia la nervadura central y termina con un oscurecimiento y la posterior necrosis. Las monocotiledóneas muestran necrosis en las puntas, mientras que en las dicotiledóneas la necrosis es tanto marginal como apical. Existen excepciones, como la cebada, en donde la necrosis aparece primero en forma de

manchas en la sección terminal de la hoja y finalmente las manchas necróticas se funden.

El exceso de Boro, puede ser lixiviado desde el suelo, a través de lavados, para lo cual se requiere una cantidad de tres veces mayor de agua que la necesaria para lixiviar la misma cantidad de Sodio o cloruro, ya que el Boro se mueve lentamente con la disolución en el suelo, al encontrarse altamente adsorbido a los minerales de arcilla, por ello, además se requiere mayor tiempo de lavado (Havlin et al., 1999; Ayres & Westcot, 1989).

Tabla 1-1: Valores indicativos de la calidad de agua para riego.

Problemas potenciales en el riego		Grado de restricción en el uso			Unidad
		Ninguno	Ligero a moderado	Estricto	
Salinidad, afecta a la disponibilidad de agua para los cultivos	CE	<0,7	0,7-3	>3	dS/cm
	SDT	<450	450-2.000	>2.000	mg/L
Toxicidad de iones específicos, afecta a los cultivos sensibles	Sodio (riego superficial)	<3	3-9	>9	RAS
	Sodio (riego con aspersores)	<70	>70	-	mg/L
	Cloro (riego superficial)	<140	140-350	>350	mg/L
	Cloro (riego con aspersores)	<100	>100	-	mg/L
	Boro	<0,7	0,7-3	>3	mg/L
Otros efectos, afectarían a cultivos sensibles	Nitrógeno Total	<5	5-30	>30	mg/L
	Bicarbonato (aspersores elevados)	<90	90-500	>500	mg/L

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Según Albornoz y colaboradores (2007), el rendimiento en tomate regado con agua con sales y con bajo contenido de Boro (0,7 mg/L), fue superior al regado con agua con sales y con nivel alto de Boro (7 mg/L). Esto permite concluir que un factor limitante y de alta relevancia para la producción de los cultivos en el Valle del Lluta, es el alto contenido de Boro en el agua de riego, lo que permite situar al valle en un área del mayor interés para el estudio de esta temática.

En el Valle del Lluta, los agricultores que han incorporado en sus procesos productivos mejoras en el sistema de riego, manejo de la fertilización, incorporación adecuada de

materia orgánica, han obtenido rendimientos en tomate de 80 a 120 ton/ha, los que resultan económicamente interesantes; estos resultados demuestran la importancia que se le debe asignar al estudio del manejo de la salinidad bajo las condiciones del Valle del Lluta (dando soluciones a la situación antes descrita, indicando las mejores técnicas, obras o infraestructura necesaria para corregir la problemática).

Es fundamental disponer de antecedentes técnicos que permitan disminuir los altos niveles de contaminantes en el agua de riego y en el suelo. La disminución del contenido de Boro, Arsénico, y otros contaminantes en el agua de riego es una alternativa que hoy es técnicamente factible, su implementación dependerá de los niveles de producción que se puedan alcanzar, con los niveles de salinidad total del agua tratada mediante las distintas soluciones que proponga el consultor adjudicado.

En términos relativos, la fuente principal de la contaminación de la Quebrada del Colpitas está ubicada en el sector del poblado de Colpitas en la zona donde existen borateras, afloramientos hidrotermales salinos con altas concentraciones de Boro, Arsénico, y otros contaminantes que serán requeridos definir con este estudio. Bajo estas condiciones, la Quebrada del Colpitas aporta más del 50% del Boro que se encuentra en la zona baja de la cuenca del río Lluta y que son del orden de 15 mg/L, siendo esta una de las razones principales del estudio que es poder analizar las diversas tipos de obras que permitan lograr disminuir los niveles de contaminantes hasta niveles cercanos a lo normal que es del orden de los 0,7 mg/L.

El Boro se encuentra en muchas regiones del mundo, en países y ciudades tales como Australia, Bangladesh, Chile, España, Estados Unidos, Italia, y Turquía (Koc, 2007). Aún cuando el Boro es un micronutriente esencial para el crecimiento de plantas (Del Campo, 2007), puede tener efectos adversos en animales y humanos en altas concentraciones presentes en aguas de consumo o riego. La concentración promedio de Boro en aguas marinas alcanza los 5 mg/L (Yazbeck et al., 2005), mientras que en aguas superficiales presenta valores entre 0,001 y 360 mg/L.

En Arica, se evaluó la tolerancia de especies vegetales ante altas concentraciones de Boro en aguas de riego en el Valle del Lluta. Se plantean las drásticas consecuencias para el crecimiento de plantaciones sensibles al Boro en suelos con concentraciones que alcanzan en promedio los 40 mg/kg. Mientras que se recomiendan cultivos tolerantes a este elemento.

El conocimiento de las condiciones de calidad del agua y de la hidrología de la Quebrada del Colpitas son escasos, por lo que se requiere aumentar el detalle de la información en esta área para poder definir estrategias de mitigación de los contaminantes que se generan en la cuenca y definir una propuesta a nivel de anteproyecto de inversión para el manejo de los contaminantes y el recurso hídrico.

Si bien existen estudios relacionados con la problemática “Análisis de descontaminación y embalse en río Lluta” (INGENDESA, 1993a), “Diagnóstico fuentes contaminantes cuenca río Lluta, provincia de Arica y Parinacota (DICTUC, 2007; 2008b), “Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad cuenca del río Lluta” (CADE-IDEPE, 2004), ninguna se enfoca directamente en la cuenca de la Quebrada del Colpitas, puesto que, solo se han estudiado los afluentes principales del río Lluta, sin embargo cada uno de ellos es un aporte en el entendimiento de la dinámica del sistema en la escala espacio-temporal superior, por lo que esta información es relevante a la hora de generar alternativas de solución a escalas menores, dado que muchas variables intrínsecas como antropogénicas no son posibles de analizar, contemplar, o identificar es escalas menores.

El clima característico de la cuenca es de tipo desértico. Este clima se caracteriza principalmente por escasez de precipitaciones, las cuales se limitan a las áreas superiores de la cuenca en el sector cordillerano. La precipitación media anual de la cuenca, aumenta gradualmente desde 0,4 mm en el sector bajo (localidad de Poconchile), a 237,7 mm en el sector alto de la cuenca (ciudad de Putre). Estos montos de precipitaciones se concentran en temporada estival producto del llamado ‘invierno altiplánico’. La temperatura media anual registrada en el sector bajo de la cuenca es de 19,1 °C y en el sector alto de 8,4 °C. La escorrentía superficial media anual registrada en la cuenca, alcanza valores no superiores a 1 mm/año en el sector bajo del Valle del Lluta hasta el sector de la Quebrada Socoroma. Desde este último sector, hacia los sectores altos de la cuenca, los valores de escorrentía aumentan hasta llegar a los 50 mm/año (Quebradas Caracarani, Colpitas, y río Azufre). Desde el punto de vista de disponibilidad de los recursos hídricos, las pérdidas de agua por evaporación son altas en comparación a otras cuencas. Estas pérdidas se registran en el sector bajo del Valle del Lluta, en los humedales del sector alto de la cuenca, y en la Laguna Blanca. Los valores promedio de evaporación registrados anualmente en la cuenca alcanzan a 2.081 mm.

1.2 Concepto General del Estudio

Este estudio tiene como objetivo general referirse a la identificación y caracterización de las fuentes que determina la calidad de aguas de la Cuenca del Colpitas, especialmente en sus contenidos de Boro, Arsénico, y otros elementos, en gran parte atribuibles a las borateras localizadas en la parte alta de esta subcuenca.

En este estudio se realizó un esfuerzo inicial para recolectar, analizar, y evaluar los datos existentes que se relacionaban con el objetivo general, como asimismo se planteó realizar un conjunto de mediciones cuyo diseño experimental obedeciese a la necesidad de completar información existente y alimentar el modelo hidroquímico, base del posible diagnóstico de la situación del lugar.

La realización del estudio requirió de un enfoque metodológico que permitiera enfatizar las acciones sobre consideraciones generales. Por ello se optó por considerar las actividades como parte de un esquema lógico, tal como se presenta en el siguiente Diagrama de Precedencia Lógica de Actividades (DPLA).

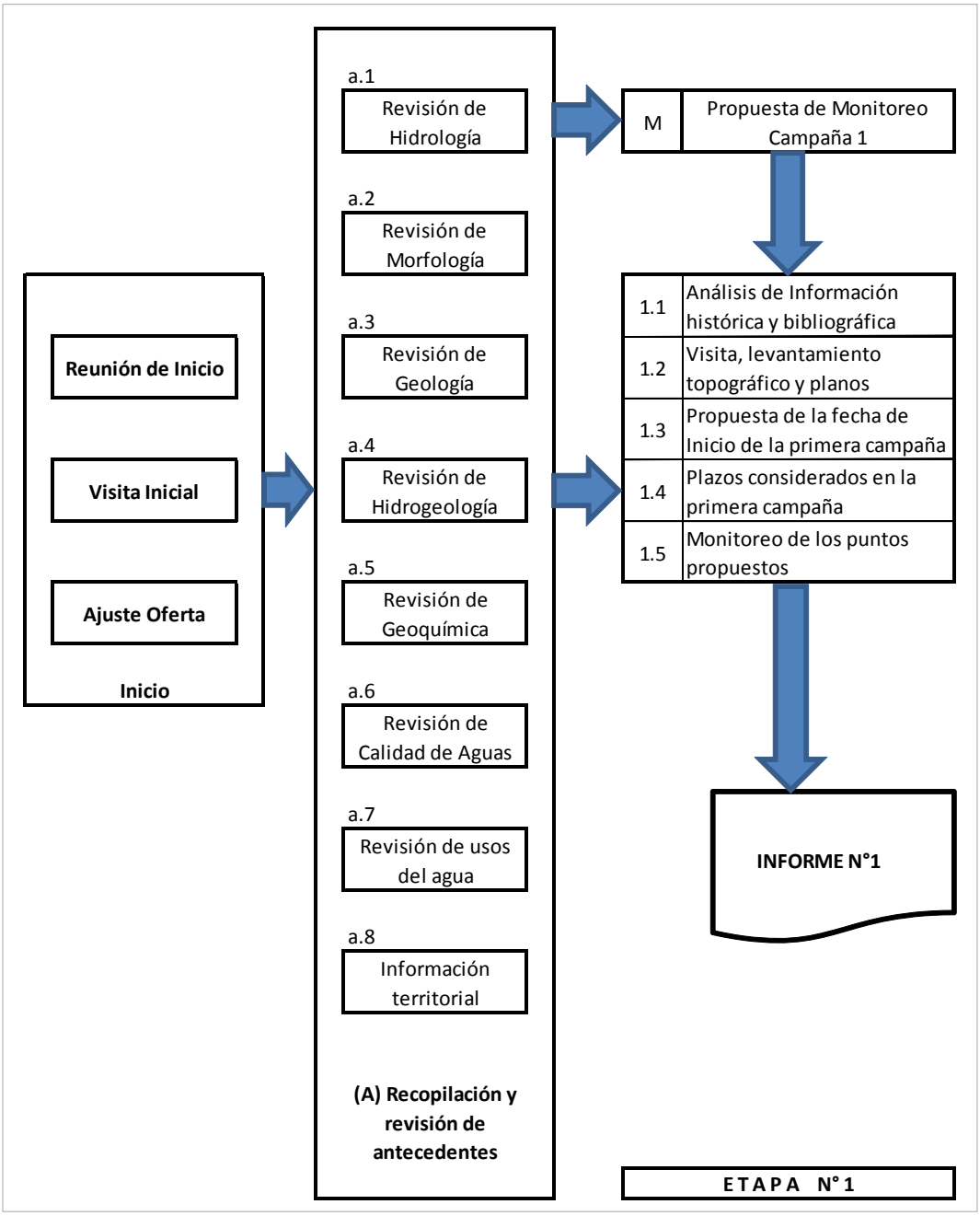
El primer DPLA muestra tres bloques interiores (Figura 1-1), el primero para enfatizar el inicio, con sus principales tareas, luego un segundo bloque que incluye las revisiones de información desglosadas por disciplinas, para finalizar con los informes, entre los que se destaca el de propuesta de primer monitoreo. El informe de esta etapa se entregó a los 60 días con el objetivo de ajustar procedimientos y dar inicio a Campañas de Terreno a lo largo de un año de proyecto.

El segundo DPLA que corresponde a la Figura 1-2, presenta la etapa N°2 con tres bloques. El primero destinado a trabajos de terreno, el segundo al inicio de la formulación del balance, y el tercero al informe, que se entregó a los 60 días, luego de la etapa precedente.

El tercer DPLA presentado en la Figura 1-3 es muy relevante ya que corresponde a la etapa N°3 de 150 días, de modo que incluye el análisis, diseño, y propuestas de acción, hasta finalizar en el informe respectivo. Esta etapa se caracteriza por su conceptualización y presentación de soluciones, con las evaluaciones técnicas y económicas. Desde el punto de vista técnico, se ofrecen los perfiles de las soluciones, donde se describen y dimensionan las obras a nivel preliminar, con mayor énfasis en los aspectos principales. La evaluación económica se entiende como la estimación preliminar basada en el costo de las soluciones.

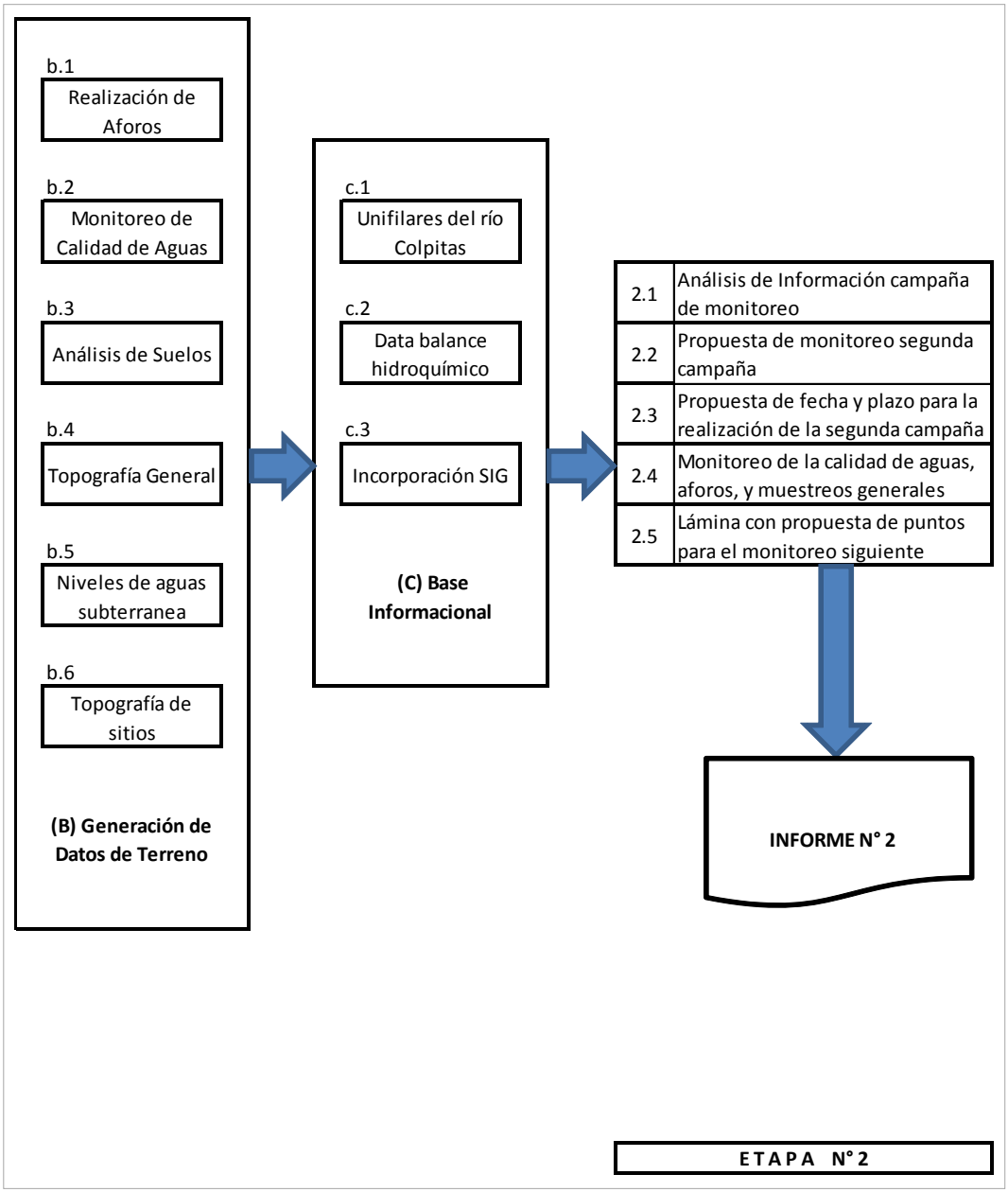
Finalmente, la etapa N°4 cierra el proyecto, incluyendo estudios adicionales, el material de difusión y los talleres, todo ello en los 60 días definidos para el informe respectivo (Figura 1-4).

Figura 1-1: Diagrama lógico de precedencia de actividades: etapa 1.



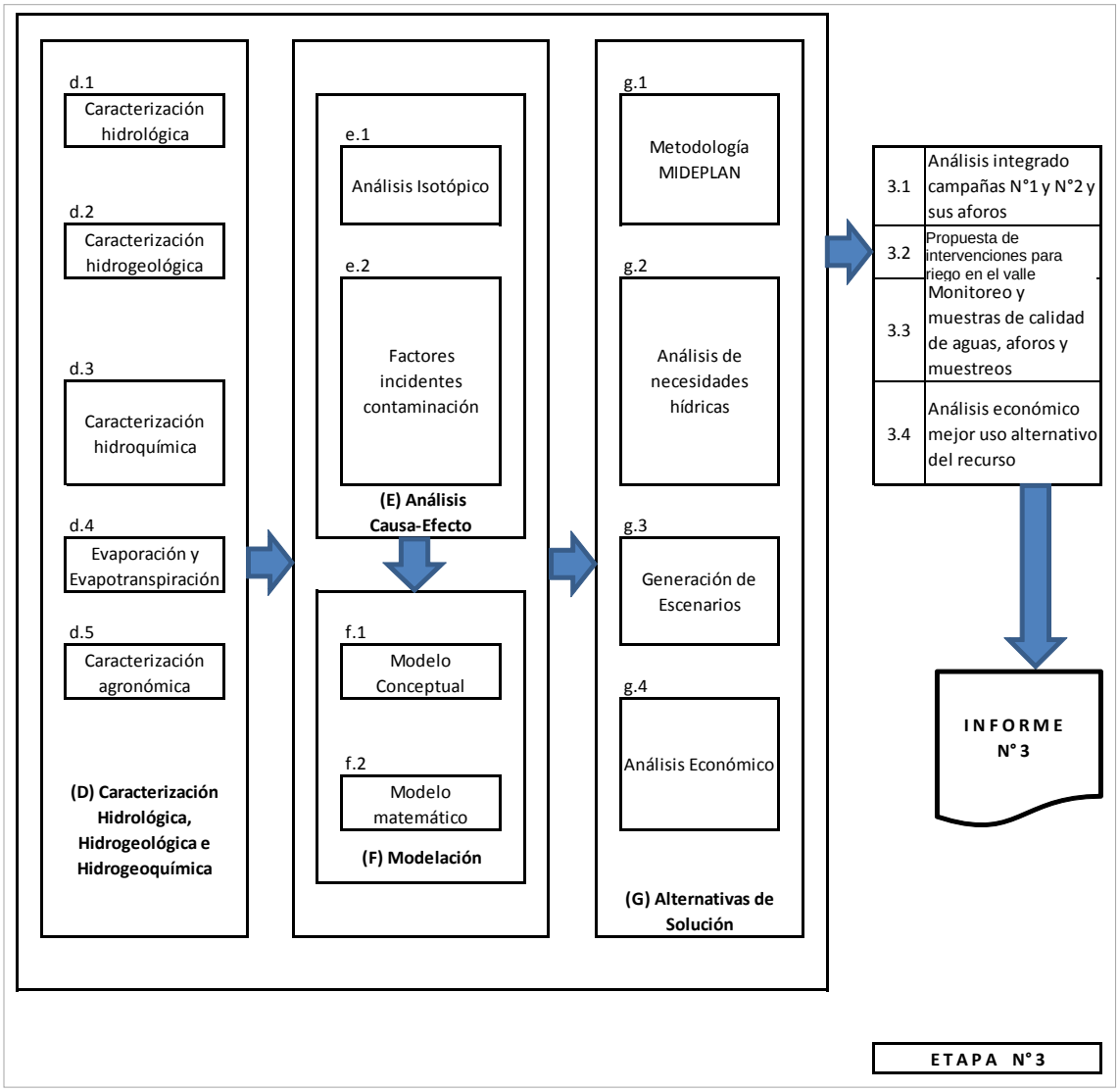
Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-2: Diagrama lógico de precedencia de actividades: etapa 2.



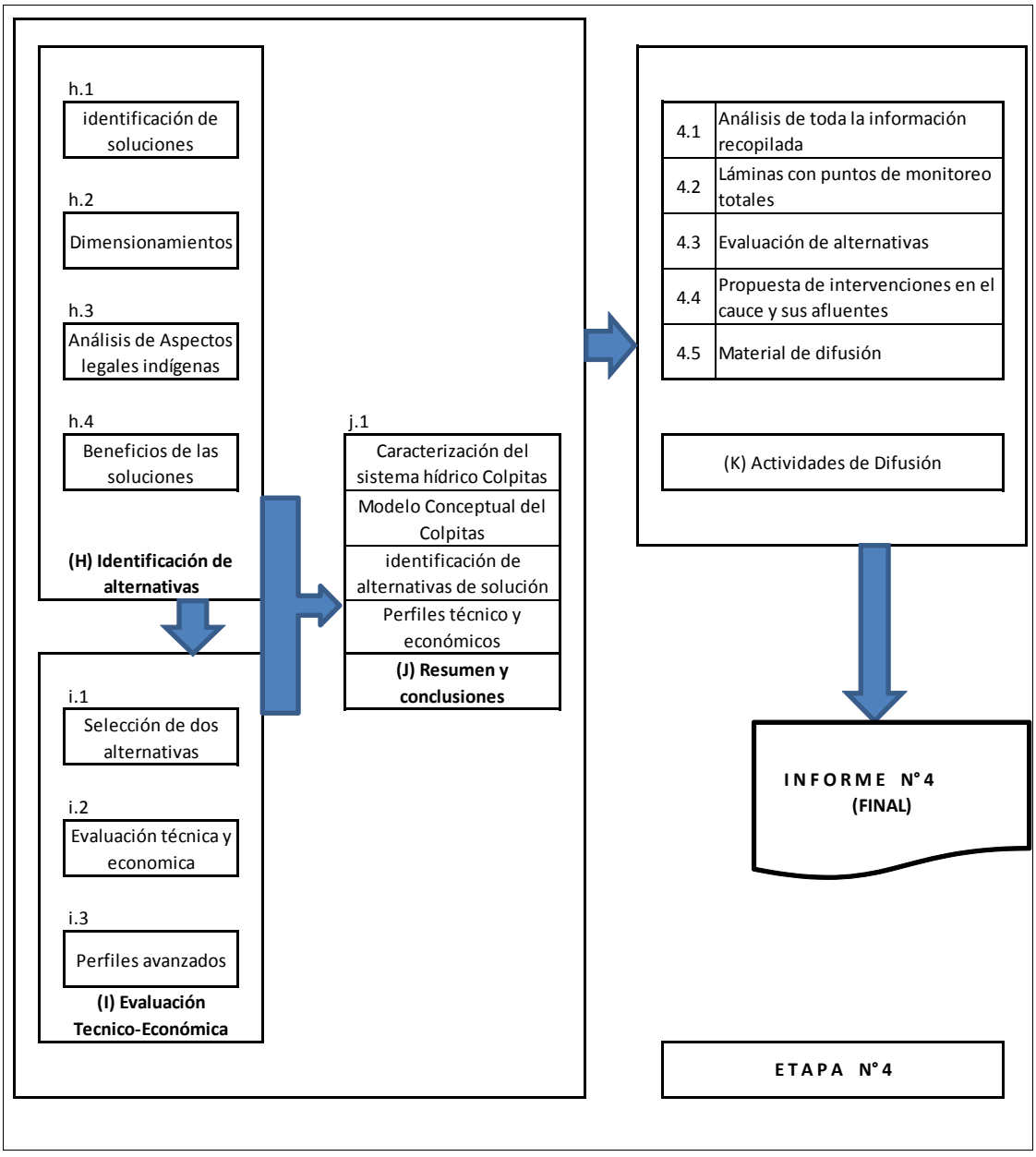
Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-3: Diagrama lógico de precedencia de actividades: etapa 3.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-4: Diagrama lógico de precedencia de actividades: etapa 4.



Fuente: Elaboración propia.

El concepto del estudio se inició presentando una aproximación conceptual del sistema hídrico que forma la Cuenca del Colpitas, lo que definió un marco de referencia al balance hídrico y al estudio en general, tanto de carácter global como específico a elementos químicos como el Boro. Como este enfoque se alimentó con información existente y con la información generada producto del presente estudio, se incluye una breve revisión de algunos aspectos considerados, entre ellos los que se relacionan con geografía, química, hidrología, y geología. Posteriormente, se presenta una breve presentación de aspectos generales de la Cuenca del Colpitas en el marco referencial de la Cuenca del Lluta, para luego referirse al plan general de trabajo.

1.3 Modelo del Sistema Hídrico del Colpitas

El estudio del sistema hídrico del río Colpitas incluye el transporte de flujo y transporte de masa en todo su recorrido: desde su nacimiento, hasta la desembocadura en el río Lluta, entendiendo que el aspecto más importante del trabajo se relaciona con las borateras localizadas en la parte alta de la cuenca, donde se presentan situaciones que se relacionan tanto con escorrentías como con contaminación del agua subterránea, la que se estima es de carácter subsuperficial, dada la geología de la zona. En la Figura 1-5 se presenta en forma simplificada el sistema hídrico, donde se distinguen procesos y corrientes que se relacionan a través de una malla causa-efecto.

El sistema hídrico queda definido por la Cuenca del Colpitas, lugar donde se desarrolla el estudio. La identificación y caracterización de procesos y corrientes, con sus respectivas transformaciones, flujos y concentraciones es una tarea esencial del trabajo propuesto.

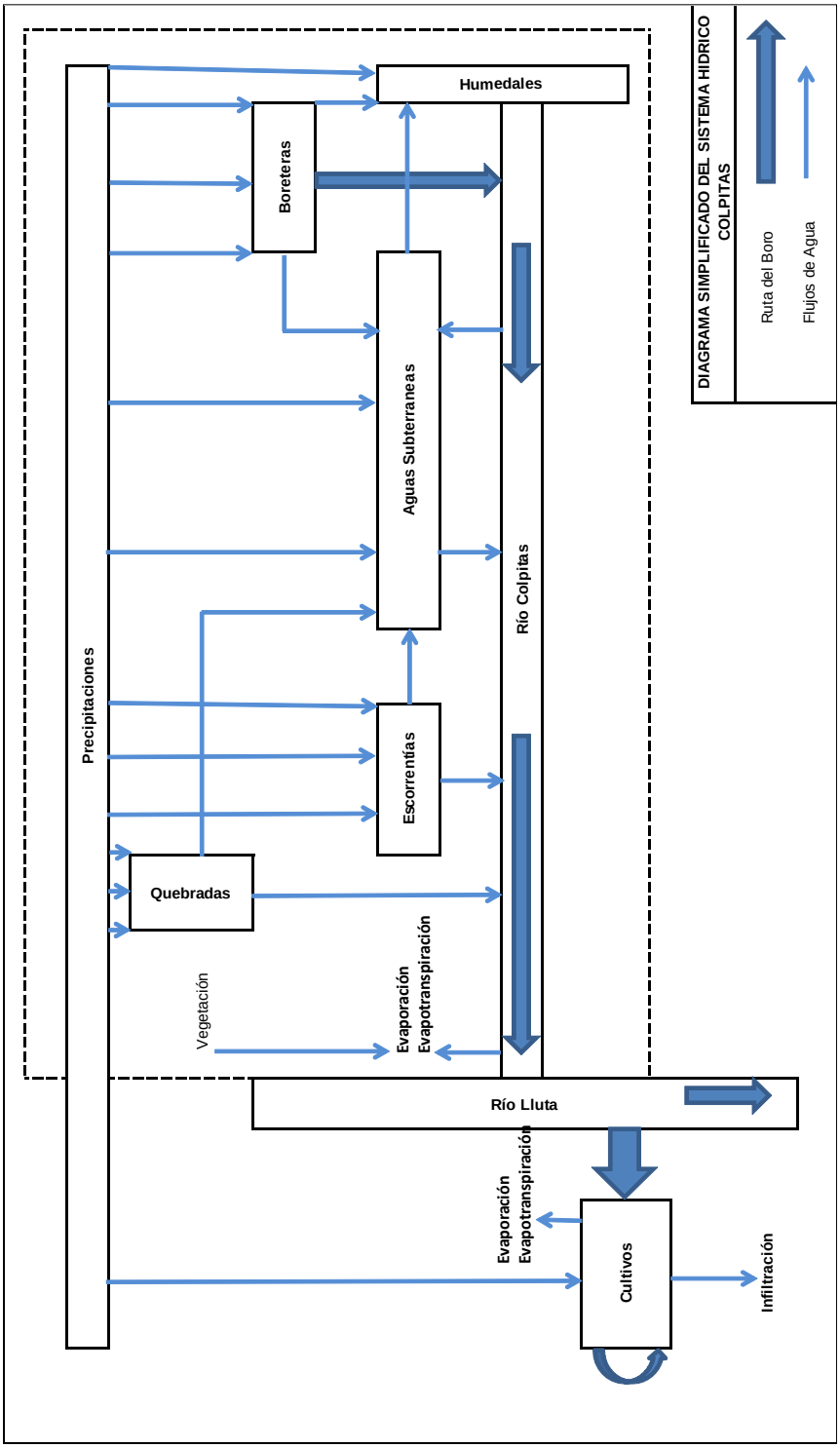
Los balances de flujo y masa se basan en términos generales en el uso de información actualizada del sistema para alimentar un modelo cuantitativo cuyo objetivo es estimar efectos de contaminación. Las ecuaciones y expresiones matemáticas se derivan de tres grandes bloques conceptuales, las ecuaciones de conservación de materia, la cinética física y química de los procesos, y las relaciones constitutivas que son expresión de las características de la subcuenca.

Cabe considerar que este sistema puede representar condiciones dinámicas y estáticas, medias y extremas (crecidas y sequías) en un ambiente caracterizado por su variación espacial y temporal. Por ello se ofrece un desarrollo preliminar de un modelo sobre la base de que sea útil para la comprensión de los fenómenos que expliquen la presencia de Boro u otros elementos en las aguas del río Colpitas. Este modelo se planteó como simplificado pero conteniendo los aspectos críticos a tomar en cuenta en el análisis y la generación de soluciones. No pretende ser el modelo final del sistema hídrico, sino una herramienta de trabajo cuyos resultados serán complementados con juicio de especialistas y conocimiento de la zona.

Con un concepto sistémico del manejo de las aguas y la calidad de las misma, se estima que se podrán desarrollar estudios específicos de materias de alto impacto en el análisis de la contaminación, entre ellas, la identificación de rutas preferentes del Boro y el Arsénico, la estimación de concentraciones frente a distintas opciones de contención química del efecto de las borateras, las condiciones físico-químicas favorables o desfavorables a un adecuado manejo, las características naturales que constituyen una restricción permanente a cualquier acción antrópica y, en general, la evaluación técnica, económica, y ambiental de las soluciones propuestas.

Para el desarrollo de este enfoque se requiere un análisis de las variables del medioambiente que condicionan al sistema, lo que se explica brevemente en la siguiente sección con una revisión bibliográfica.

Figura 1-5: Diagrama simplificado del sistema hídrico del río Colpitas.



Fuente: Elaboración propia.

1.4 Antecedentes Generales

1.4.1 Químico-Física del Boro en el Ambiente

El Boro es un metaloide, de masa molar 10,806 (g/mol), y número atómico 5 (Lid, 2008-2009). No se encuentra en la naturaleza como elemento puro si no que formando minerales, principalmente aquellos que contienen el enlace de alta afinidad Boro-Oxígeno. Estos minerales se presentan como boratos simples o mezclados con elementos o compuestos como Sodio, Calcio, Magnesio, silicatos, Hierro, y cloruros (Sassolita, Bórax, Kernita, Colemanita, Inyoita, Priceita, Ulexita, Probertita, Ascharita, Inderita, Pinnoita, Hidroboracita, Datolita, Ludwigita, y Boracita).

Al ser móvil y volátil, el Boro se acumuló en la última fase de los flujos o erupciones magmáticas. Los minerales se formaron por reacciones de contacto a alta temperatura de Boro con elementos en rocas durante la intrusión de disoluciones hidrotermales (acompañando al magma) en otras formaciones, o por la meteorización o hidratación y reacción en los afloramientos, bordes, o cerca de las fallas de otros depósitos de boratos. Cuando este flujo logró llegar a la superficie en cuencas cerradas y áridas, se formaron depósitos de borato económicamente viables (Garret, 1998).

1.4.1.1. El Boro en el Mundo y en Chile

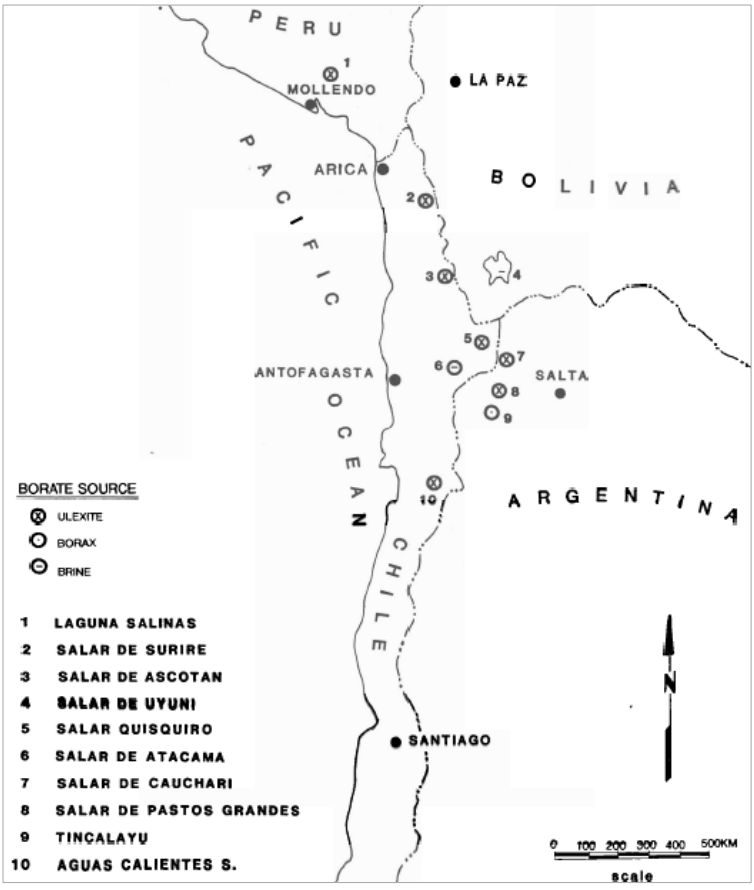
Los mayores yacimientos de boratos (Figura 1-6) en el mundo están en las montañas del Himalaya, en los Andes de Sudamérica, en Sierra Nevada (al oeste de Estados Unidos), cerca del Mar Rojo (en zonas de Turquía y Yugoslavia), y en skarns en China y Rusia. No hay una razón por la que estos depósitos se encuentran en estos lugares, pero tienen en común que todos parecen ser formados por afloramientos hidrotermales y en áreas con volcanes activos (basoalto y toba). La mayoría están en zonas de alta tasa de descarga en pelovolcanes en zonas de subducción y esto se considera el mecanismo más importante de flujo de Boro (Kopf & Deyhle, 2002; Garret, 1998).

En Sudamérica hay más de 40 depósitos de boratos distribuidos en 885 km en la zona alta de los Andes, cerca de los límites de Argentina, Bolivia, Chile, y Perú, zona que además se caracteriza por tener salares que son depósitos de boratos (Figura 1-7).

Figura 1-6: Actuales fuentes de boratos en el mundo.

Fuente: Kistler & Helvaci, 1994.

Figura 1-7: Principales yacimientos de boratos en Sudamérica.



Fuente: Kistler & Helvaci, 1994

En Chile existen varios minerales de Boro, pero el más importante es Ulexita (Figura 1-8), también existen otros en menor cantidad como la Colemanita, Ginorita, Hidroboracita, Iquiqueita, y Probertita asociados a nitratos en grandes salares a los pies de altos volcanes. La oxidación catalítica del Nitrógeno (por acción del aire) produce nitratos y otras sales oxidadas que son capturadas por la 'camanchaca'. Las sales son transportadas por fallas y acuíferos, donde la naturaleza en extremo higroscópica de los nitratos resulta en transporte capilar hacia la superficie de los salares con la consecuente evaporación y concentración de las sales en la superficie.

Figura 1-8: Ulexita proveniente de Calama, Antofagasta, Chile.

En los salares de Ascotán, Maricunga, Pedernales, Pintados, Cariquima, Quillagua, y Surire se encuentra principalmente la Ulexita ocasionalmente asociada a Halita, Bórax, y salmuera de otras sales en menor proporción. Por ejemplo en algunas zonas del salar de Ascotán, Chamberlin (1912) describió al mineral Ulexita como "(…) *extraordinariamente pura (…)"* (Garret, 1998; Ericksen et al., 1986). Si bien en el salar de Atacama la Ulexita es el principal mineral de Boro (con trazas de Terugita y Nobleita), también existen altas concentraciones de Litio (como Kainita, sulfato de Litio, y sulfato de Litio y Potasio), y de Potasio (como Silvina y Arcanita) mezcladas en salmuera junto con Halita (Rodgers et al., 2002; Garret, 1998).

1.4.1.2. Propiedades Químico-Físicas del Boro

La Ulexita se transforma en ácido bórico por hidrólisis ácida, por ejemplo con ácido sulfúrico, a través de la siguiente ecuación:

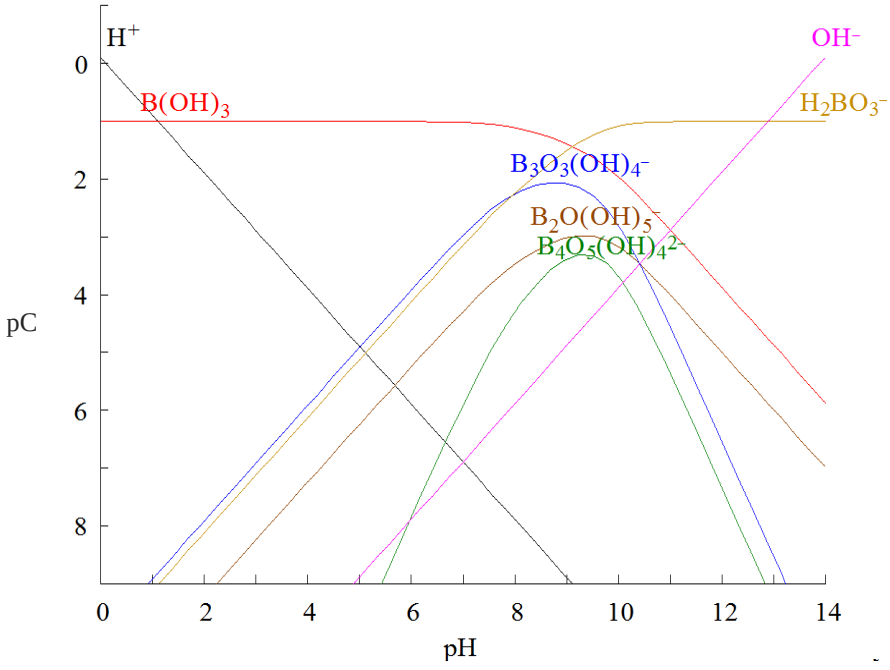
$$\underbrace{Na_2{\cdot}2CaO{\cdot}5B_2O_3{\cdot}16H_2O_{(s)}}_{\text{Ulexita}} + 3H_2SO_4 \rightarrow 2Na^+_{(ac)} + 2CaSO_4{\cdot}2H_2O_{(s)} + SO^{-2}_{4(ac)} + \underbrace{10H_3BO_{3(ac)}}_{\text{ácido bórico}}$$

El ácido bórico acuoso y la solubilidad de otros compuestos de Boro son dependientes del pH; el ácido bórico posee dos constantes de acidez, que a 20 °C tienen valores pK_{a1} = 9,27 y pK_{a2} > 14 (Lid, 2008-2009).

La Figura 1-9 muestra la dependencia de la concentración del ácido bórico o Sassolita acuosa (líneas roja y amarilla) con el sistema en equilibrio buffer a pH = 9,27, y además otros compuestos Ameghinita en disolución (azul), Pentahidratoborita en disolución (café), y Bórax en disolución (verde).

Todos los minerales en disolución muestran una máxima de concentración, y por ende de disolución, cercano al valor de pK_{a1} del sistema del ácido bórico, por lo que se estima que sistemas acuáticos con estos valores de pH (o cercanos), presentarán minerales de Boro en etapa de disolución por acción de la acidez reinante.

Figura 1-9: Diagrama pC-pH a 25°C para el sistema ácido bórico con concentración total 0,1 M y fuerza iónica 0,1 M.

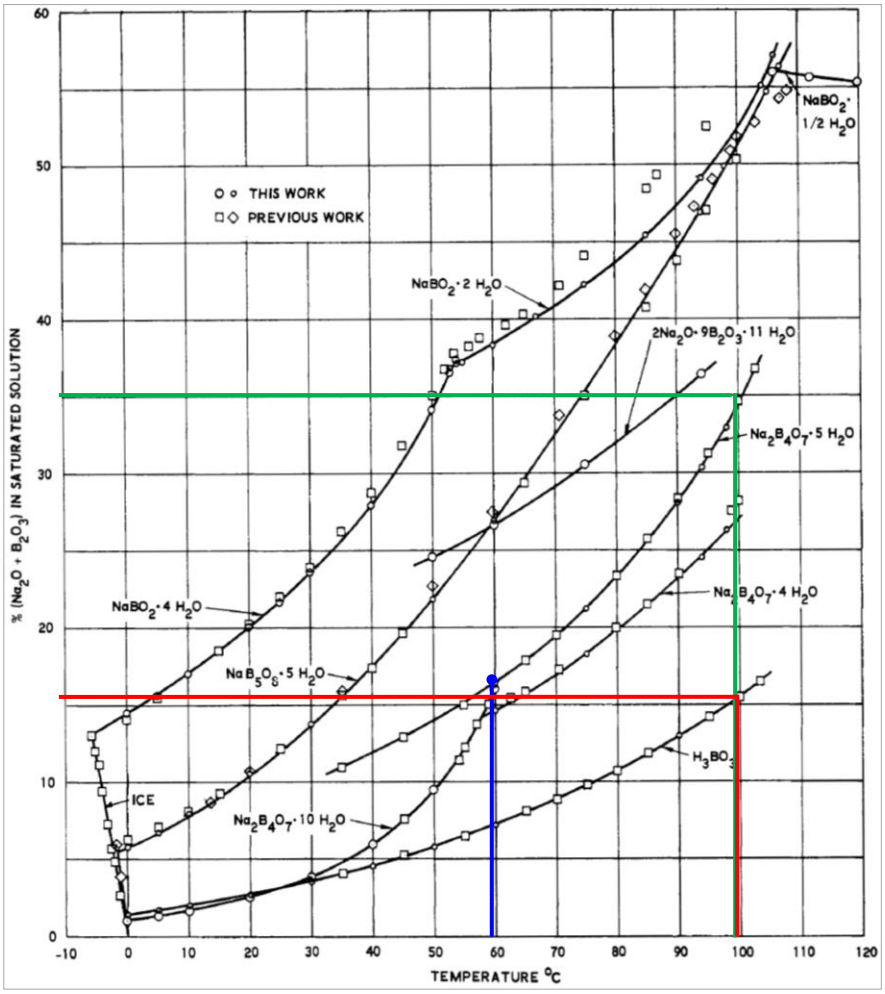


Fuente: elaboración propia.

El ácido bórico tiene una solubilidad a 25 °C de 5,80 g/100 g de agua (Lid, 2008-2009). Nies y Hulbert (1967) describieron las curvas de solubilidad vs temperatura de ácido bórico y otros boratos de Sodio en disolución saturada de los mismos compuestos (Figura 1-10).

Se encontró estabilidad en los boratos de Sodio dada la alta temperatura a la que fueron expuestos. La Figura 1-10 muestra que el ácido bórico tiene una solubilidad de 15,5 g/100 g de disolución saturada a 100 °C (línea roja). El bórax a los 60,8 °C tiene una transición al bórax-pentahidrato (línea azul), aumentando aún más su solubilidad hasta llegar a 34,5 g/100 g de disolución saturada a los 100 °C (línea verde). De esta forma, se observa que el ácido bórico y los boratos de Sodio son muy solubles al aumentar la temperatura incluso en disoluciones saturadas.

Figura 1-10: Curva de solubilidad vs temperatura de ácido bórico (H_3BO_3), bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), pentaborato ($NaB_5O_8 \cdot 5H_2O$), y metaborato ($NaBO_2 \cdot 4H_2O$) de Sodio.



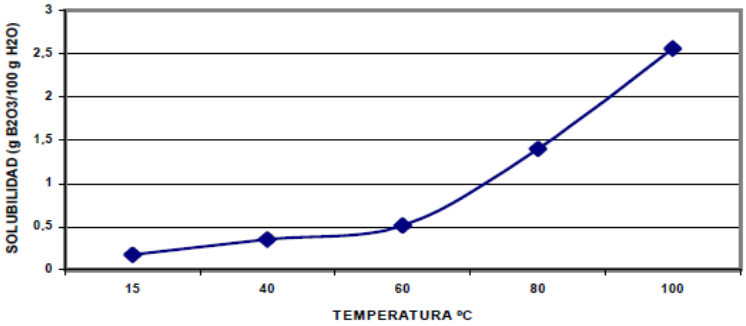
Fuente: Nies & Hulbert, 1967.

Garcés y colaboradores (2003) estudiaron la solubilidad de Ulexita del salar de Ascotán en agua, obteniendo la curva de solubilidad presentada en la Figura 1-11, la cual es descrita mediante la siguiente ecuación:

$$S_{B_2O_3}=0,492011-0,0249246T+0,0004535T^2$$

El pH medido en los experimentos tuvo un promedio de 8,627 ±0,0997, lo que concuerda con los valores de pH de solubilidad en que se encuentran los boratos (Figura 1-9).

Figura 1-11: Solubilidad vs temperatura de Ulexita expresada como g B_2O_3/100 g H_2O.



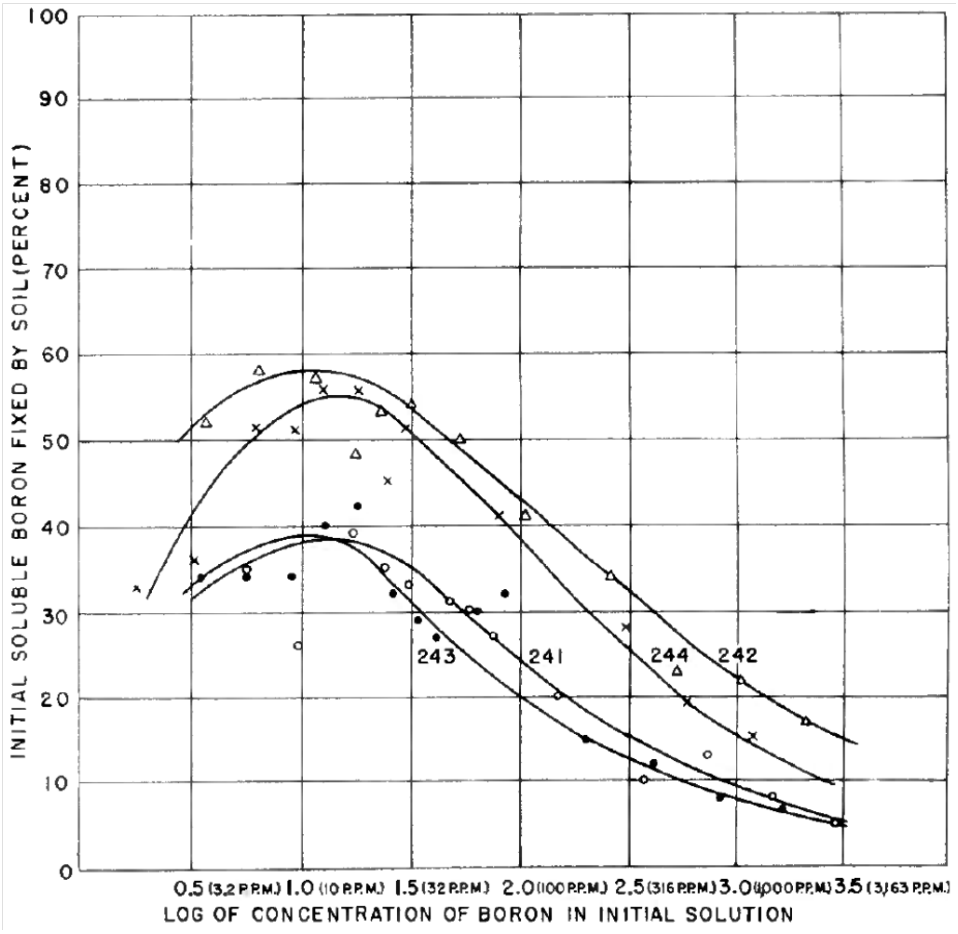
Fuente: Garcés et al., 2003.

Sobre los procesos de movilización del Boro en la naturaleza, se ha encontrado una máxima de adsorción de Boro en arcillas, oxihidróxidos de Hierro y de Aluminio, y en materia orgánica entre los valores de pH 8 y 10 con la consecuente retención de boratos en ellos y transporte físico que pueda sufrir. Al contrario, en condiciones acídicas, los valores de adsorción decaen rápidamente hasta llegar a ser despreciables. (Bundschuh et al., 1994).

Eaton y Wilcox (1939) realizaron experimentos de sorción de Boro en cuatro suelos (Figura 1-12) 'Handford grava arenosa franca' (241), 'Handford arenoso franco' (242), 'Yolo franco' (243), y 'Dublin arcilla franca' (244); que resultaron en un máximo de saturación de Boro de 18%, 25%, 32%, y 45% respectivamente.

Otros autores encontraron interacciones de competencia en la sorción con otros compuestos y elementos como los silicatos y el Potasio, que ocupan los lugares de sorción de los boratos (Hadas & Hagin, 1972; Bingham & Page, 1971).

Figura 1-12: Fijación de Boro en suelos humedecidos a ¾ de su capacidad con disolución de ácido bórico.



Fuente: Eaton & Wilcox, 1939.

En resumen, el Boro en la naturaleza se presenta principalmente como boratos, que tienen una alta solubilidad y estabilidad a medida que aumenta la temperatura. Los boratos tienen alta capacidad de ser sorbidos en superficies reactivas (arcillas, oxihidróxidos de Hierro y de Aluminio, y en materia orgánica) con fuerte dependencia del pH (a pH acídicos la sorción es nula, mientras que entre pH 8 a 10 la sorción es máxima), y con la interacción competitiva de otros iones de geometría molecular similar (como silicatos).

1.4.1.3. Geoquímica del Boro en las borateras de Colpitas

Las borateras ubicadas en la Cuenca del Colpitas corresponden a salares andinos o cuencas evaporíticas. Estas pueden tener un control tectónico, haberse formado por acumulación de materiales volcánicos, o estar ubicadas en estructuras volcánicas tipo caldera. Su marco geológico corresponde, casi exclusivamente, a rocas volcánicas del Terciario Superior-Cuaternario, sobreyaciendo a un basamento mesozoico-paleozoico (Chong et al., 2000).

En muchos casos, los yacimientos de boratos están relacionados directamente con volcanes en actividad o con campos geotérmicos. Las cuencas son someras y pueden alcanzar más de 100 m de espesor de relleno sedimentario-evaporítico. Además de los salares andinos están los lagos salinos andinos que consisten en cuerpos lacustres ubicados en el mismo tipo de cuencas, pero con una masa de agua libre significativa.

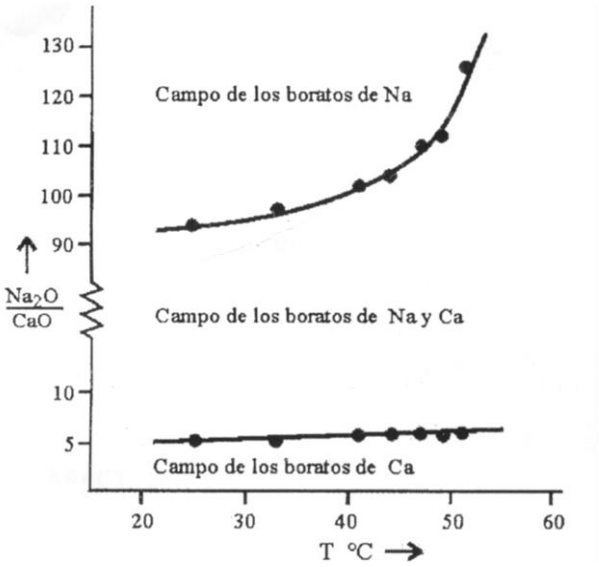
Dado que se presentan estados intermedios, se habla de 'salar' cuando la superficie salina cubre una superficie superior al 50% de la cuenca evaporítica, y 'lago' cuando es el agua la que supera este porcentaje. En algunos casos esta diferencia es difícil de precisar, toda vez que algunos salares se convierten en lagos efímeros durante el período de lluvias torrenciales del invierno altiplánico.

El volcanismo activo determina un alto gradiente geotérmico que incrementa, cuantitativa y cualitativamente, la lixiviación de grandes volúmenes de roca por el hidrotermalismo, cuyos solutos son transportados y acumulados en las cuencas salinas (Chong et al., 2000). Navarrete (2012) encontró en el bofedal de Colpitas aguas cloruradas de pH cercano a neutro, interpretando como aguas termales de un sistema hidrotermal maduro. Los elementos conservativos son Cloro, Boro, y Litio, todos muestran razones constantes y con una sola tendencia, lo cual se interpreta como una sola fuente de aguas termales.

En estas cuencas se reconocen los mayores yacimientos de boratos del país, y su génesis está asociada a la sobresaturación de las salmueras en boratos y posterior precipitación de éstos. Este mecanismo se describió como la evolución de un proceso lacustre con enriquecimiento progresivo en Boro, hasta alcanzar un estado de precipitación continua en un marco de interrelación de mecanismos químico–evaporíticos (Chong et al., 2000).

En la Figura 1-13, Inan y colaboradores (1973) definieron los campos de estabilidad para el sistema de los boratos de Sodio y Calcio, en función de la relación Na_2O/CaO en el agua y de la temperatura. Los boratos de Calcio serían estables para razones Na_2O/CaO en el agua inferiores a 5, mientras que los boratos de Sodio necesitan una relación Na_2O/CaO superior a 100. Esto explicaría la presencia, en exclusividad, de la Ulexita en los depósitos chilenos.

Figura 1-13: Determinación experimental de los campos de estabilidad de isoboratos de Na y Ca como una función de Na_2O/CaO y la temperatura.



Fuente: Inan et al., 1973.

El análisis DRX de los minerales de alteración muestra presencia de Halita, Yeso, Calcita, y boratos, como Ulexita, Santita, y posible Sassolita (Navarrete, 2012). Los cuerpos mineralizados de Ulexita corresponden a horizontes y nódulos. Los horizontes resultan de acumulación de nódulos constituyendo un horizonte continuo, formado por precipitación de la salmuera intersticial en la interfase vadoso–freática. Ese lugar está sometido a concentración progresiva por evaporación de las salmueras que ascienden por capilaridad a través de la capa vadosa, según un mecanismo clásicamente descrito para la formación de las evaporitas de crecimiento desplazativo en el seno de una matriz fangosa (Chong et al., 2000).

La causa de que tanto los horizontes y nódulos se presenten, según un nivel perfectamente definido, se debe a que es el nivel freático el que controla su posición en profundidad. Las zonas sometidas a evaporación capilar precipitan eflorescencias en superficie. Estas eflorescencias no dejan registro fósil porque son siempre recicladas por la lluvia, el viento y las inundaciones periódicas durante el 'invierno altiplánico' y vuelven a alimentar en solución al freático salino, contribuyendo así a su progresiva concentración en iones (Chong et al., 2000).

En el bofedal de Colpitas se encontró que fluidos hidrotermales, provenientes de desgasificación volcánica ascienden hasta los manantiales, en donde interactúan con los productos de desgasificación orgánica. Este fenómeno es muy probable dado que los manantiales se desarrollan en el sector del bofedal. La Figura 1-14 ilustra las características del sistema hidrotermal de Colpitas que Navarrete (2012) construyó,

donde se grafican el origen de fluidos hidrotermales; procesos y condiciones geológicas que sufrirían los gases al ascender desde una fuente profunda.

De acuerdo con esta información sumada a la que se dispone de la calidad del agua del Colpitas, se desarrollan hipótesis de estudio, cuya aprobación o rechazo resulta fundamental para formular un modelo químico conceptual.

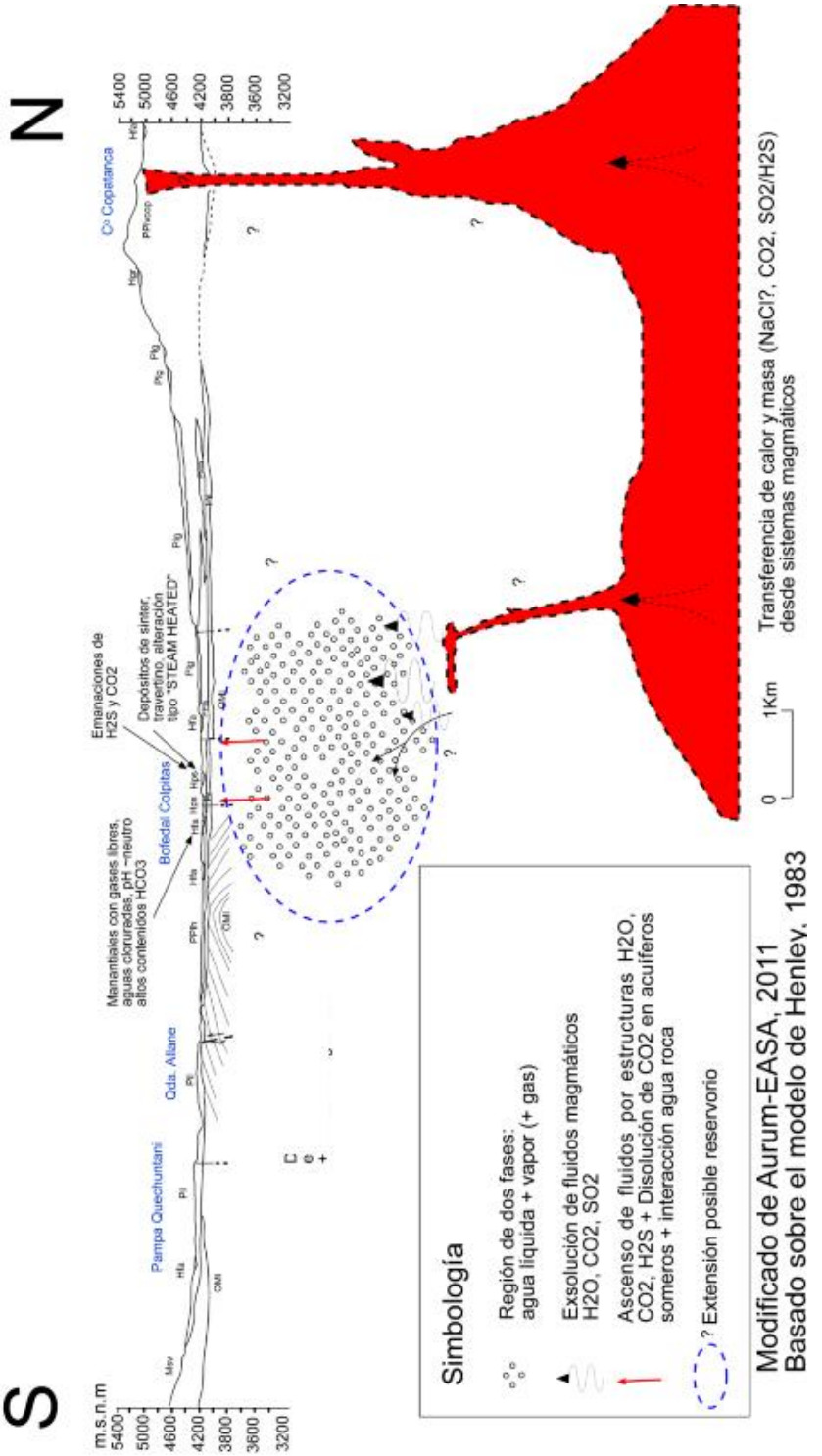
En forma preliminar, estas hipótesis se pueden presentar de la siguiente forma:

- El Boro proviene esencialmente de las borateras, traspasado al medio líquido a través de procesos de lixiviación que se ven acelerados por el nivel termal de las aguas. Esta hipótesis se basa en el hecho reconocido de que la solubilidad del Boro aumenta con la temperatura de una forma creciente, no lineal, que favorece su disolución.

- Las aguas provenientes de la Quebrada Allane no tienen el mismo nivel de concentración de Boro, debido a que las condiciones del medio, específicamente el suelo y la roca, no son similares al sitio de las borateras.

- La contaminación por Boro en el río Lluta está condicionada por la situación del río Colpitas, cuya influencia es decisiva en la calidad de sus aguas.

Figura 1-14: Modelo conceptual del origen de los fluidos hidrotermales.



Fuente: Navarrete, 2012.

1.4.2 Caracterización Preliminar del Sitio

La Cuenca del Colpitas, uno de los principales afluentes del río Lluta, se encuentra ubicada en la XV Región de Arica y Parinacota. Su cuenca se encuentra entre los 17°50'32'' y los 18°05'51'' de latitud sur y entre los 69°21'12'' y los 69°37'41'' de longitud oeste. Corresponde a la zona más septentrional de la hidrografía de Chile, drenando un área total de 459,04 km².

Para una caracterización preliminar del sitio se llevó a cabo una Campaña de Terreno, donde se realizó una inspección visual de la zona de estudio, comprendiendo un recorrido desde la parte alta de la cuenca hasta la desembocadura del río Colpitas en el río Lluta. Esto permitió identificar detalladamente las características que a continuación se presentan.

1.4.2.1. Fisiografía

El cauce del río Colpitas es estrecho y encajonado en algunos sectores, y sinuoso en la mayor parte de su recorrido. Hacia el norte de la subcuenca se ubican varias quebradas, que van continuamente alimentando el cauce del río Colpitas, para juntarse al río Caracarani en Coronel Alcérreca, dando origen al río Lluta.

El nacimiento del río Colpitas está ubicado sobre una franja volcánica que cambia desde una dirección NS que se extiende a lo largo del país, a una franja con alineamiento diagonal de dirección NW-SE, reflejo de la tectónica de placas plasmada a su vez en la forma de la línea de costa. Esta franja volcánica diagonal se extiende desde los Nevados de Payachatas (volcanes activos Parinacota y Pomerape) por el SE hasta el volcán Tacora (volcán activo en territorio chileno, colindante con Perú) por el NW, pasando por las serranías de Ancolacane, a cuyos pies meridionales se ubican las borateras de Colpitas. Inmediatamente al sur de esta localidad se ubican los Nevados de Putre y el volcán Tarapacá.

El clima característico de la cuenca es de tipo desértico con altas tasas de evaporación, escasa precipitación y amplitud térmica. De acuerdo con Aquaconsult (2006) la precipitación media anual de la cuenca es de 193,6 mm en la localidad de Poconchile en el sector bajo de la cuenca (Estación DGA Alcérreca), y 237,7 mm en la localidad de Putre, en el sector alto de la cuenca (Estación DGA Putre). La precipitación se ve afectada en la temporada estival, entre los meses diciembre y marzo, debido al invierno altiplánico, donde se concentra el 90% de de la precipitación anual (DGA, 2010) y el río Colpitas alcanza su mayor caudal.

Las condiciones climáticas extremas han favorecido la subsistencia de vegetación especializada, con pocos requerimientos hídricos, y capaces de soportar las oscilaciones térmicas. Los bofedales son un ejemplo de formación de vegetación que

se ha adaptado a estas condiciones extremas y cubren una vasta extensión en la parte alta del río Colpitas.

Los bofedales constituyen zonas de pastoreo donde se alimenta el ganado camélido, principal fuente de desarrollo productivo de la comuna, entre los que se cuenta con llamas, alpacas, y vicuñas.

Las principales actividades económicas en la Cuenca del Colpitas son el turismo, la ganadería y agricultura de los pueblos originarios, así como actividad minera mediante exploraciones geotérmicas desarrollada por Energía Andina.

De acuerdo con lo observado en terreno, y como se muestra en la Figura 1-15, la Cuenca del Colpitas se ha zonificado en 5 sectores, los que se describen a continuación:

- Sector Colpitas Alto: con una superficie de 23,95 km², este sector corresponde a la zona alta de la Cuenca del Colpitas después de su nacimiento e incluye sus afluentes superiores que no pasan por zonas identificables como borateras.

- Sector Colpitas en Borateras: con una superficie de 100,11 km², este sector se ubica inmediatamente aguas abajo del Sector Colpitas Alto y corresponde a la parte de Cuenca del Colpitas, donde se manifiestan los afloramientos de Boro. Incluye también aquellos afluentes del río Colpitas, que confluyen en el sector de las borateras, o bien, que en su trazado pasan por alguna.

- Sector Colpitas Medio: con una superficie de 88,78 km², este sector se ubica inmediatamente aguas abajo del Sector Colpitas en Borateras y corresponde a la cuenca intermedia de este cauce. Abarca aproximadamente desde el cruce de la ruta A-125 sobre el río Colpitas, hasta su confluencia con la Quebrada Allanes. Incluye la cuenca hidrográfica de la Quebrada Iquilla, el principal afluente del río Colpitas en este sector y el segundo en importancia de toda la cuenca.

- Sector Quebrada Allane: con una superficie de 233,43 km², este sector corresponde a la cuenca hidrográfica de la Quebrada Allanes, el afluente principal del río Colpitas en todo su desarrollo, hasta el punto de confluencia entre ambos cauces.

- Sector Colpitas Bajo: Con una superficie de 12,75 km², este sector corresponde a la cuenca hidrográfica del río Colpitas entre su punto de confluencia con la Quebrada Allanes y su punto de confluencia con el río Lluta.

1.4.2.2. Red Hídrica

El río Lluta a lo largo de su recorrido, de aproximadamente 147 km de longitud, recibe el aporte de numerosos cauces, tales como el río Azufre, la Quebrada del Caracarani, y los ríos Colpitas y Socoroma. Su régimen hidrológico es pluvial, concentrándose las lluvias principalmente en los meses de diciembre a marzo, producto del fenómeno conocido como 'invierno altiplánico'.

El nacimiento del río Colpitas se produce aproximadamente 11 km al oriente de la localidad de Colpitas, a una altitud de 4.570 m.s.n.m. Tras un recorrido total cercano a los 33 km, confluye en el río Lluta en las inmediaciones de la localidad de Coronel Alcérreca, a una altitud de 3.617 m.s.n.m. En la Figura 1-16 se presenta sus principales afluentes, los cuales corresponden a las Quebradas Allane e Iquilla, las que sumadas a un gran número de quebradas, generan en el punto de salida de la cuenca, un caudal medio anual de 0,53 m^3/s, de acuerdo con la estadística de la Estación Fluviométrica de la DGA Colpitas en Alcérreca, ubicada en el tramo final del cauce antes de la confluencia con el río Lluta.

Tal como se aprecia en la Figura 1-17, en el sector de las borateras existe una nutrida red de escurrimientos menores que aportan sus aguas al río Colpitas (línea azul). Algunos de ellos atraviesan zonas claramente identificadas como borateras (líneas rojas), mientras que otros escurren por zonas donde no se visualiza la presencia de ellas (líneas verdes).

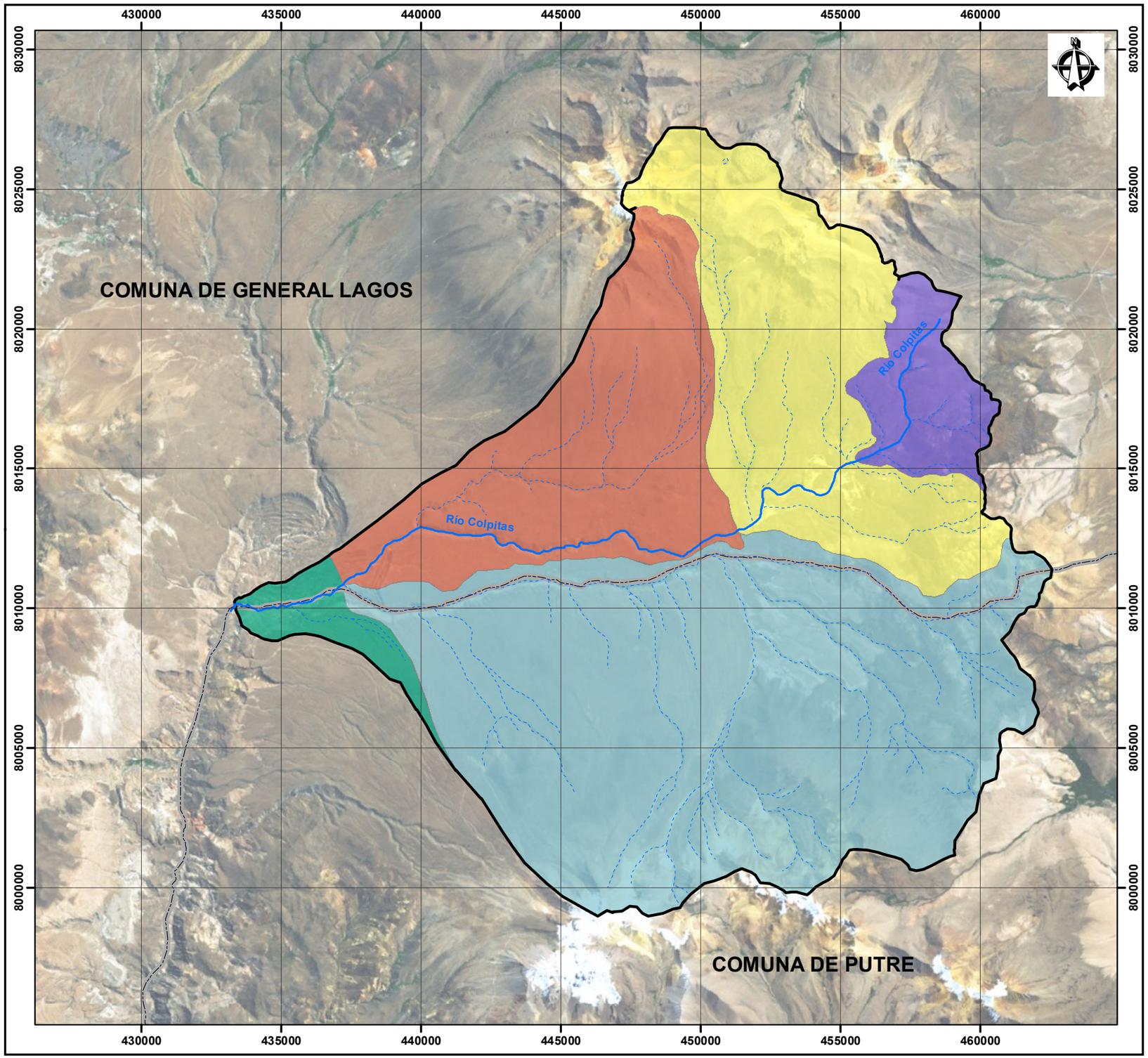
Dentro de los escurrimientos que atraviesan las borateras, se destacan las Quebradas Copatanca, Castilluma, y Pococagua. La gran mayoría de los cauces presentes en la zona de las borateras y la red hídrica dentro de la Cuenca del Colpitas presentan zonas bastantes amplias de bofedales en su trayecto.

1.4.2.3. Formaciones Vegetales

Tanto en el cauce del río Colpitas como en sus quebradas afluentes es posible encontrar formaciones vegetales. Para identificar estas formaciones vegetales en el área visitada, se utilizó como referencia la Guía Descriptiva de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres de la Ecorregión Altipánica (SVAHT) (Ahumada & Faúndez, 2009).

El documento citado señala que estos sistemas vegetacionales están ampliamente distribuidos en la cordillera de los Andes, sin embargo son un recurso muy escaso situación que los transforma en lugares relevantes por su diversidad biológica e importancia como sistema productivo para familias locales.

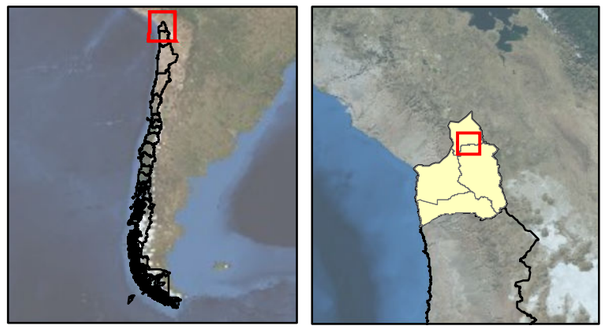
Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco



Leyenda

Zonificación

- Zona 1: Sector Colpitas Alto
- Zona 2: Sector Colpitas en Borateras
- Zona 3: Sector Colpitas Medio
- Zona 4: Sector Quebrada Allanes
- Zona 5: Sector Colpitas Bajo
- Río Colpitas
- Quebradas
- Límite comunal



TITULO

Zonificación de la Cuenca del río Colpitas

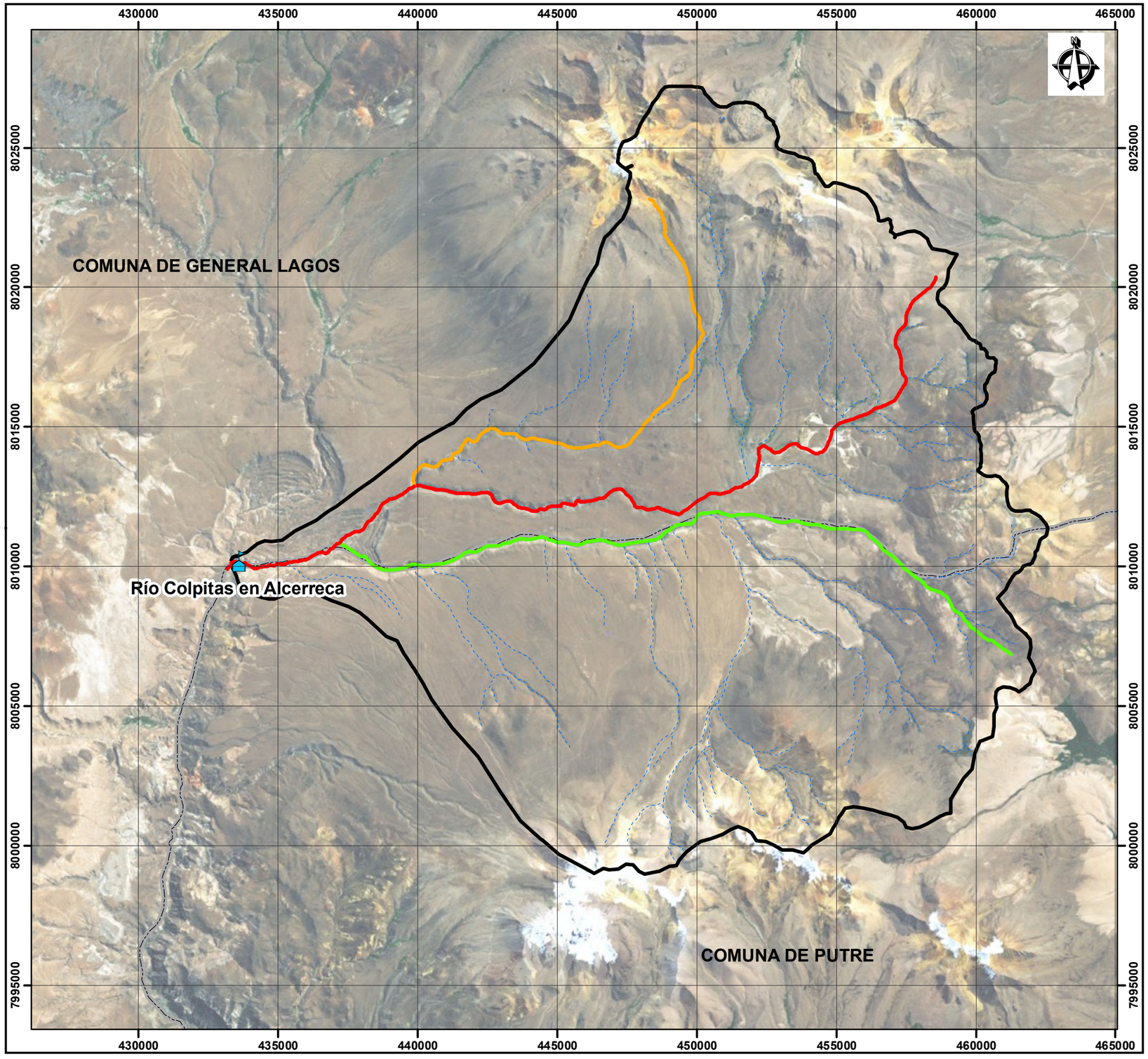
PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N° E90008	ESCALA:	E. GRAFICA: 2 1 0 2 Km	FIGURA 1-15

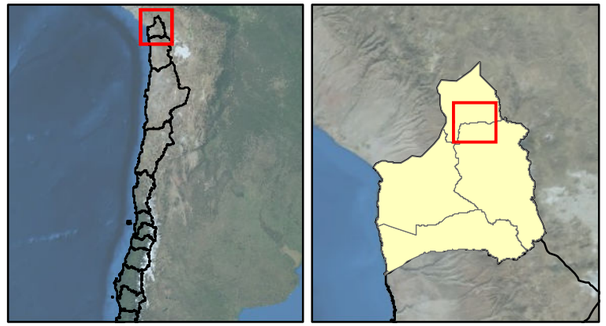
Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_1-15.mxd



Leyenda

- Estación Fluviométrica
- Río Colpitas
- Quebrada Allanes
- Quebrada Iquilla
- Quebradas menores
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal



TITULO

Red hídrica y afluentes principales de la Cuenca del río Colpitas

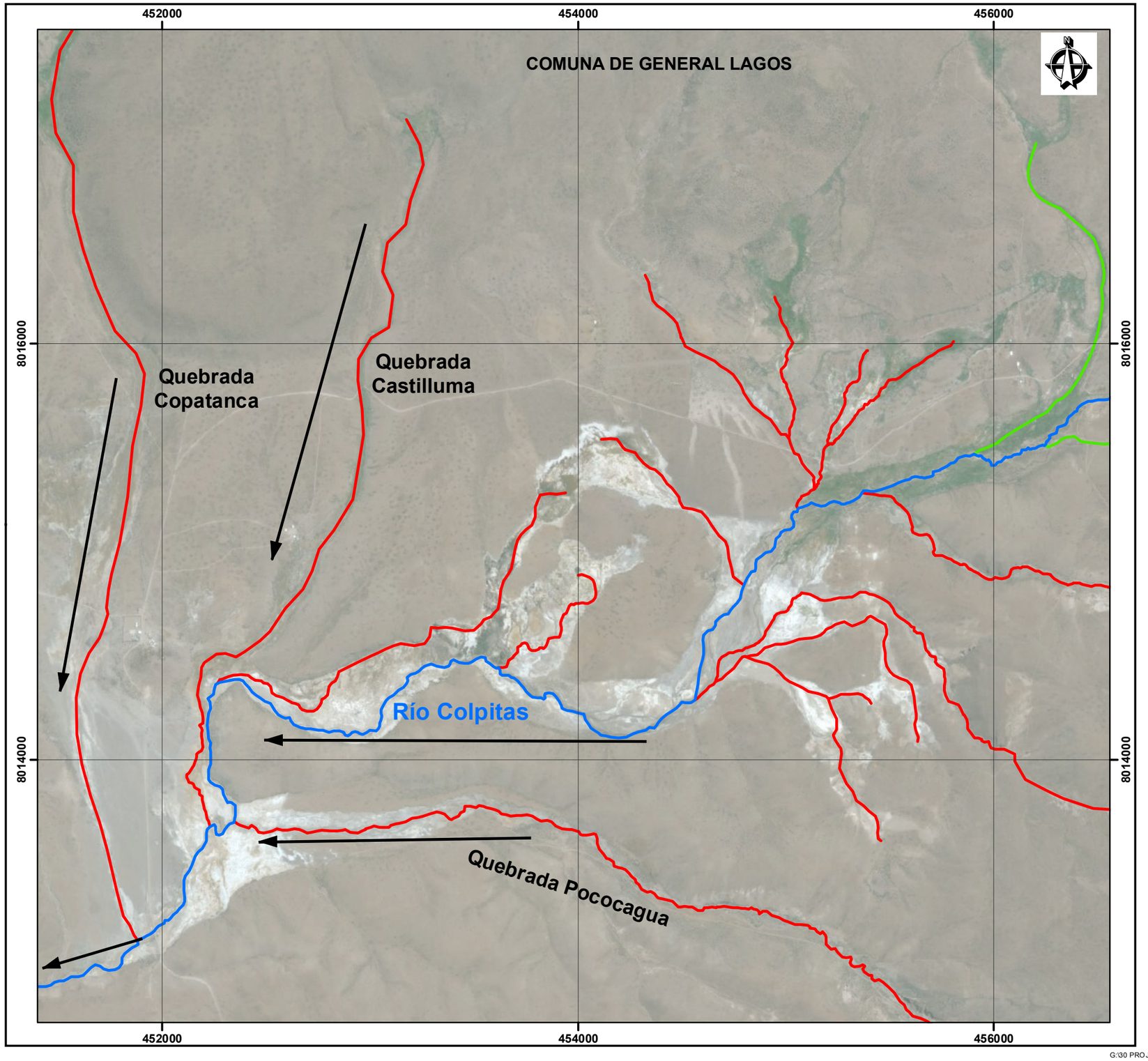
PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1:150.000	2 1 0 2 Km	1-16

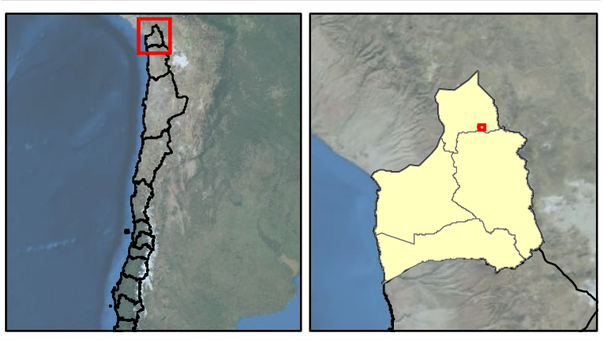
Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_1-16.mxd



Leyenda

- Río Colpitas
- Escurrimientos sin Boro
- Escurrimientos con Boro
- Dirección de flujo



TITULO

Red hídrica en sector de Borateras

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N° E90008	ESCALA: 1:50.000	E. GRAFICA: 200 100 0 200 Metros	FIGURA 1-17

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_1-17.mxd

Basado en los criterios definidos en la Guía, se realizó un reconocimiento preliminar de formaciones vegetacionales presentes en el cauce del río Colpitas siendo de especial interés las formaciones dependientes de la humedad del sitio (vegetación hidrófila a halófila), y donde además existe la condición de presencia discontinua de afloramientos salinos sobre la superficie de las plantas que componen la formación dominante.

Así, se observó que a través del cauce del Colpitas se desarrollan Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres (SVAHT) que son dependientes del agua que escurre por el cauce principal y en los cauces de las quebradas afluentes. Los tipos encontrados en los cursos superficiales corresponden fundamentalmente a: bofedales no salinos, bofedales salinos, vegas no salinas, y vegas salinas.

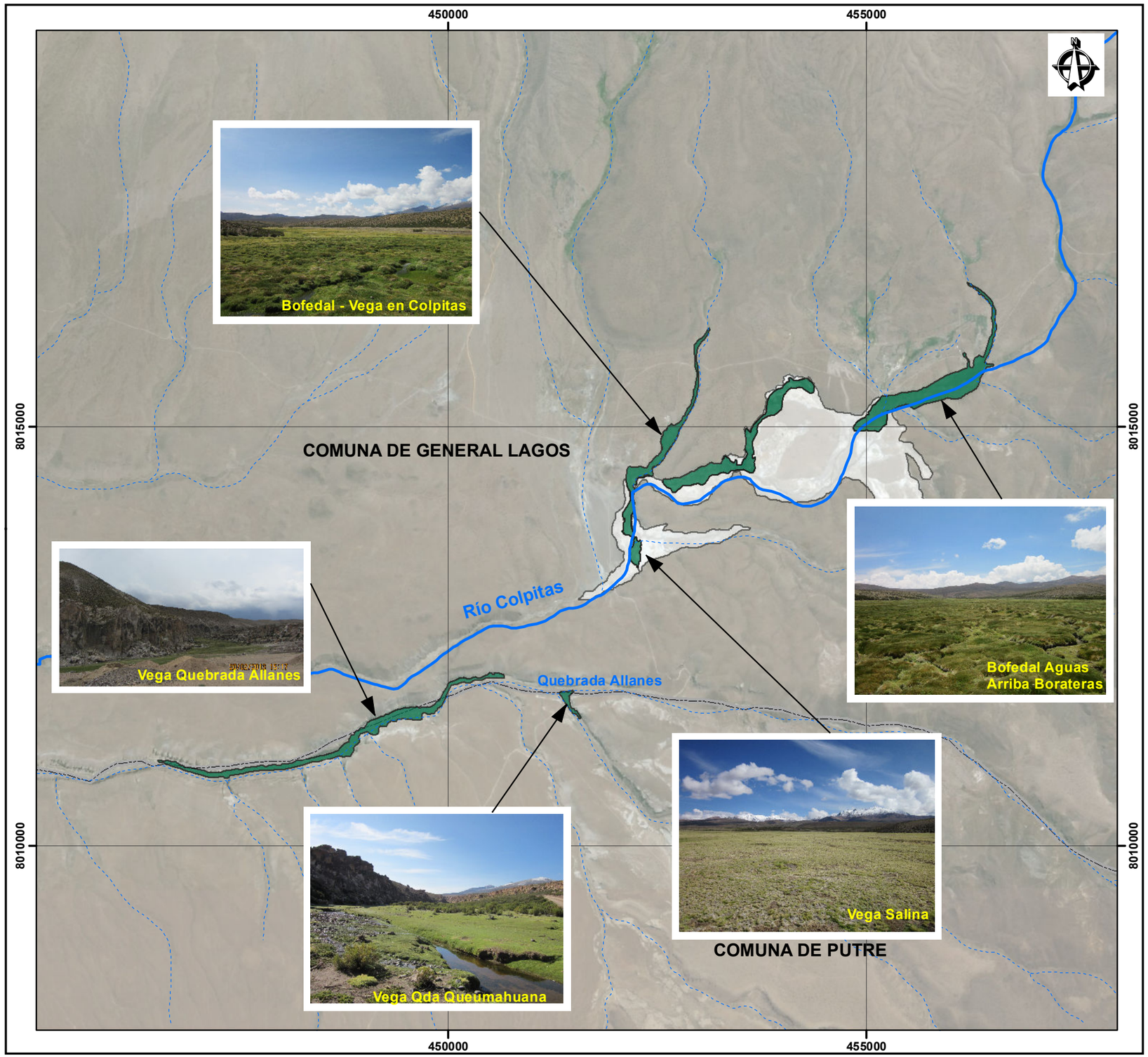
Un aspecto importante que se presenta en estas áreas dice relación con la cobertura salina, que puede presentarse durante el período seco o de forma permanente. La cobertura salina, así como también la cobertura vegetal, puede presentar variaciones estacionales o interanuales ya que en la medida que disminuye el aporte hídrico, la evapotranspiración del agua arrastra sales que van quedando en la superficie y que comienzan a visualizarse en condiciones de sustrato seco. Lo anterior se considera un indicador para identificar la mayor o menor aridez del sitio y la dependencia de la vegetación al aporte hídrico, siendo ésta una de las características que presenta el área de estudio.

La presencia de afloramientos salinos tanto en cobertura como estacionalidad y las especies vegetales que componen parte del ecosistema terrestre está influenciada por el aporte hídrico. La cobertura salina en vegas y bofedales del río Colpitas se presenta en el período seco y en algunos sectores, en forma permanente. Esto ocurre porque a medida que disminuye el aporte hídrico, la evapotranspiración del agua arrastra sales que van quedando en la superficie y comienzan a visualizarse condiciones de sustrato seco.

La intensidad de afloramiento salino en el área de interés puede ser modificada por las condiciones climáticas, de modo que la interacción de ambos factores representa la dependencia del ecosistema a las aguas subterráneas.

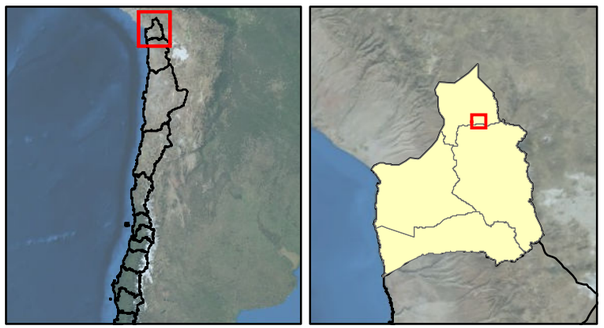
Los tipos vegetacionales identificados durante la visita de reconocimiento son principalmente formaciones del tipo bofedal salino y no salino, asociado con vegas las que pueden ser salinas o no salinas. Si bien en la cuenca existe una cantidad mayor de formaciones, las principales asociadas a los cursos de aguas involucrados en el estudio se presentan en la Figura 1-18 y se detallan en la Tabla 1-2.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco



Leyenda

- Río
- Quebrada
- Bofedales
- Borateras
- Límite comunal



TITULO

Bofedales de la Cuenca del río Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1:50.000	500 250 0 500 Meters	1-18

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_1-18.mxd

Tabla 1-2: Vegetación hídrica en el área de influencia directa.

Formación	Coordenada[1]	
	E	N
Bofedal aguas Arriba de borateras	455.866	8.015.434
Bofedal y vega en sector Borateras	453.617	8.014.845
Bofedal y vega en sector Colpitas	452.185	8.014.363
Vega Salina Aguas abajo de Colpitas	452.241	8.013.452
Vega Quebrada Queumahuana	451.418	8.011.744
Vega Quebrada Allanes	449.622	8.011.607

1 Datum: WGS84.

El suministro hídrico en las áreas indicadas está dado por cursos superficiales que atraviesan planicies en las que se desarrolla vegetación hidromorfa; así como también en las proximidades al curso donde el abastecimiento de agua puede ser por inundación o por infiltración lateral.

En áreas donde el agua no ha pasado por borateras, es posible encontrar formaciones de bofedal no salino. Aguas abajo de las borateras, la superficie cubierta por sales aumenta, en tanto que la vegetación presente es principalmente vega salina. El bofedal no salino domina en la parte alta de la cuenca así como en los afluentes de los cauces principales

Como se ha señalado y de acuerdo a lo observado en imágenes satelitales de Google Earth, para distintos años las formaciones vegetacionales del área pueden variar su superficie de cobertura de acuerdo a la época del año y entre temporadas, consecuencia de disponibilidad de precipitaciones; así como también varía el afloramiento salino.

1.4.2.4. Borateras

El sector de las borateras se encuentra ubicado a 2 km al este de la localidad de Colpitas, en las coordenadas 8.015.000 N y 454.000 E a una altitud media de 4.150 m.s.n.m. Este sector corresponde a depósitos evaporíticos de donde procede la mayor fuente de Boro, los cuales están relacionados directamente con volcanes en actividad o con campos geotérmicos.

Los depósitos evaporíticos son depósitos sedimentarios que se forman por la cristalización de sales disueltas, proceso que es favorecido por condiciones climáticas áridas extremas de alta evaporación, y por el aporte de agua dulce. Estas cuencas evaporíticas (salares) están relacionadas geológica y genéticamente con la actividad

volcánica desarrollada durante el Terciario Superior al Cuaternario, y cuyos productos sobreyacen a un basamento de edad mesozoica-paleozoica.

Los depósitos de boratos ligados a fuentes termales, que son la mayor parte de los yacimientos conocidos en los salares, se ubican eventualmente, en relación con el nivel freático, en los primeros metros a partir de la superficie, de las secuencias salino-detríticas de las cuencas.

La inspección visual del sector de las borateras mostró afloramientos de tipo geotérmico como se observa en la Figura 1-19, una bifurcación del río Colpitas entremedio de la boratera (Figura 1-20), así como una fuerte asociación con formaciones vegetales (Figura 1-21).

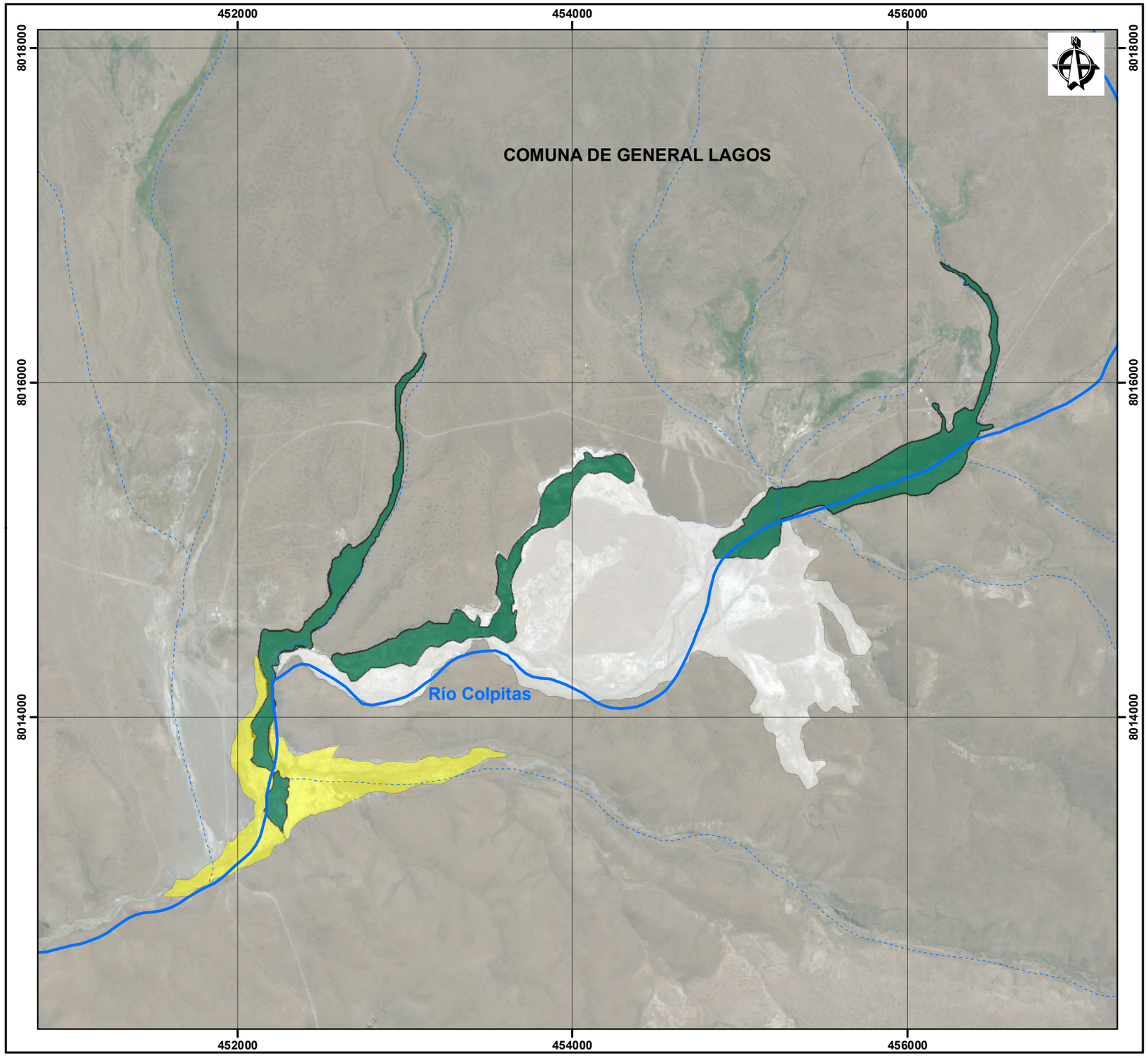
Figura 1-19: Afloramientos termales en las borateras del río Colpitas.

Figura 1-20: Corrientes hídricas a través de las borateras.

Figura 1-21: Formaciones vegetales en las borateras del río Colpitas.

La superficie de las borateras del río Colpitas se determinó a partir del recorrido visual en terreno, y su área de 2,811 km^2 fue calculada con ayuda de Google Earth. En la Figura 1-22 se presenta un detalle de la zona de las borateras y la red hídrica de este sector. La boratera señalada con color blanco presenta un área de 2,304 km^2, la cual fue observada en la vista preliminar de terreno, mientras que la boratera señalada con color amarillo presenta un área de 0,507 km^2 y no fue observada en terreno.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco



Leyenda

- Río
- Quebrada
- Borateras
- Boratera No Observada
- Bofedales

TITULO

Borateras del río Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1:50.000	500 250 0 500 Metros	1-22

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_1-22.mxd

1.4.3 Geología y Volcanismo

La geología del sector bajo del Valle del Lluta presenta dos clasificaciones de rocas; rocas del basamento y rocas cuaternarias. La primera de ellas se encuentra conformada por la formación Azapa, formación Oxaya, formación El Diablo y sus bloques deslizados en este orden ascendente.

Las formaciones de rocas volcánicas presentes en la cuenca influyen en la calidad del agua del sector. El río Azufre esta principalmente influenciado por el volcán Tacora, el que confiere al río Lluta su alto contenido de azufre, pH bajo, y metales en disolución, como el Boro. Además, la presencia de formaciones andesíticas aguas abajo de la junta con la Quebrada Caracarani, disminuye aún más el pH, lo que se ve acrecentado por la presencia de rocas andesíticas y volcánicas en el sector de aguas abajo de la Quebrada Colpitas.

1.4.4 Régimen Hidrológico

Al interior de la cuenca se localizan una serie de estaciones fluviométricas operadas por la DGA, que permiten caracterizar el régimen hidrológico de la cuenca.

Sobre la base de la información de las estaciones mencionadas precedentemente es posible indicar que la cuenca del río Lluta presenta un régimen pluvial con crecidas importantes entre los meses de enero a marzo, producto de las precipitaciones estivales debido al denominado 'invierno altiplánico'. El periodo de estiaje para esta cuenca se presenta desde abril hasta diciembre, debido a la escasez de precipitaciones, con algunas excepciones en ciertas estaciones fluviométricas, donde se aprecian pequeños aumentos de caudales en los meses de invierno, producto de precipitaciones esporádicas. Para la subcuenca alta, desde el nacimiento del río Lluta hasta la junta de la Quebrada Aroma y subcuenca media, desde la junta de las Quebradas Aroma y Cardones, se aprecia que estadísticamente el periodo de menores caudales ocurre en el trimestre septiembre, octubre, y noviembre.

1.4.4.1. Antecedentes Hidrológicos

En la Cuenca del Colpitas se dispone de información fluviométrica de una estación monitoreada por la DGA. Además se seleccionó dos estaciones fluviométricas de la DGA cercanas a la zona de estudio pertenecientes a las cuencas de los ríos Caracarani y Lluta. En la Figura 1-23 se presenta la ubicación de las estaciones seleccionadas para el presente estudio, y en la Tabla 1-3 se presenta las características de las estaciones utilizadas en el marco del presente estudio.

Figura 1-23: Ubicación de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio.

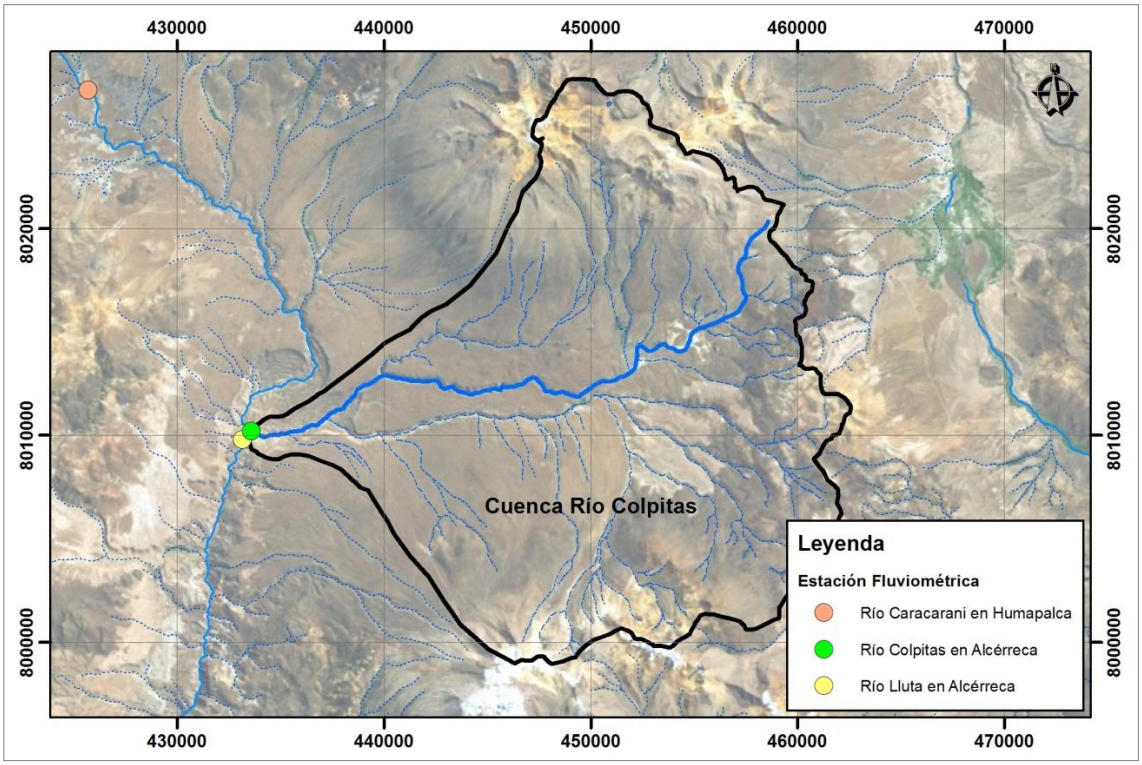


Tabla 1-3: Estaciones fluviométricas seleccionadas para la zona de estudio.

Estación	Código BNA	Coordenada[1]		Altitud (m)	Vigencia	Años de registro
		E	N			
Río Colpitas en Alcérreca	01201001-K	433.593,7	8.010.202	3.630	X	51
Río Caracarani en Humapalca	01201005-2	425.695,8	8.026.667	3.950	X	40
Río Lluta en Alcérreca	01201003-6	433.161,7	8.009.791	3.585	X	51

1 Datum: WGS84.

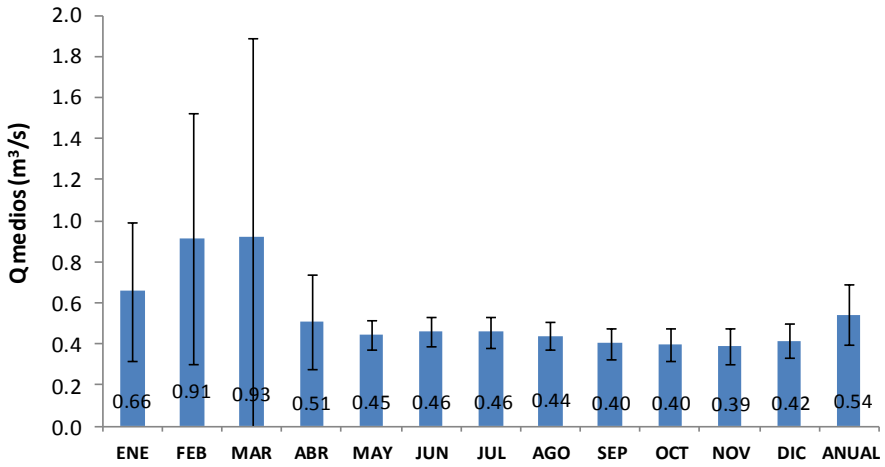
Con base en la estaciones de monitoreo tanto fluviométricas como pluviométricas que la DGA posee en la zona norte de Chile, se han realizado una serie de estudios, los cuales presentan una caracterización y un análisis de las estadísticas de escurrimientos y precipitación con el objeto de cuantificar el comportamiento del recuso hídrico para diferentes fines. Entre los estudios más relevantes en la zona de estudio, están UC (2012), DICTUC (2008a), CADE-IDEPE (2004), y Primas Ingeniería Ltda. (1992).

UC (2012) realizó un análisis hidrológico para la estación fluviométrica río Colpitas en Alcérreca para determinar un análisis de frecuencia basado en información histórica el período 1982-2011 por medio de una estadística sin relleno de datos faltantes y basada en promedios mensuales y la desviación estándar de los datos. Los caudales medios mensuales estimados fluctuaron entre 0,39 y 0,93 m^3/s con un valor promedio anual de 0,54 m^3/s, observando 2 períodos de caudales como se muestra en la Figura 1-24.

Por otra parte DITUC (2008) realizó la estimación de caudales medios mensuales mediante análisis de frecuencia de la estación fluviométrica río Colpitas en Alcérreca a partir de un registro estadístico de 38 años sin realizar extensión ni relleno de las series de caudales mensuales debido a la escasez de estaciones fluviométricas dentro de las cuencas o a que en general los ríos o quebradas estudiadas contaban con una sola estación, y por lo tanto se consideró que no existía información suficiente para realizar correlaciones apropiadas.

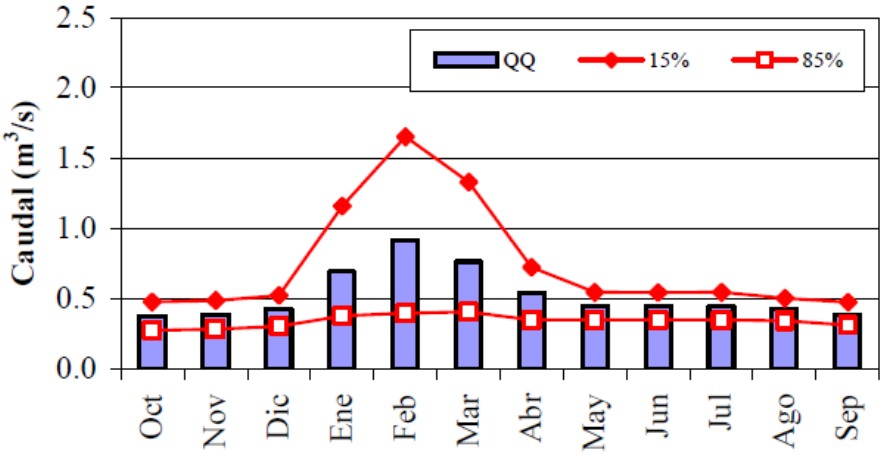
La Figura 1-25 presenta los valores promedios mensuales y los valores estimados a partir del análisis de frecuencia con probabilidad de excedencia 15% y 85% para la estación río Colpitas en Alcérreca para un año hidrológico (octubre–septiembre) (DITUC, 2008). En esta figura se aprecian valores de caudal que fluctúan entre 0,38 y 0,92 m^3/s y un caudal promedio anual de 0,52 m^3/s, valores levemente inferiores pero muy similares a los señalados por UC (2012).

Figura 1-24: Caudales medios mensuales y su desviación estándar: estación Colpitas en Alcérreca (1982–2011).



Fuente: UC, 2012.

Figura 1-25: Caudal medio mensual en estación Colpitas en Alcérreca.



Fuente: DICTUC, 2008a.

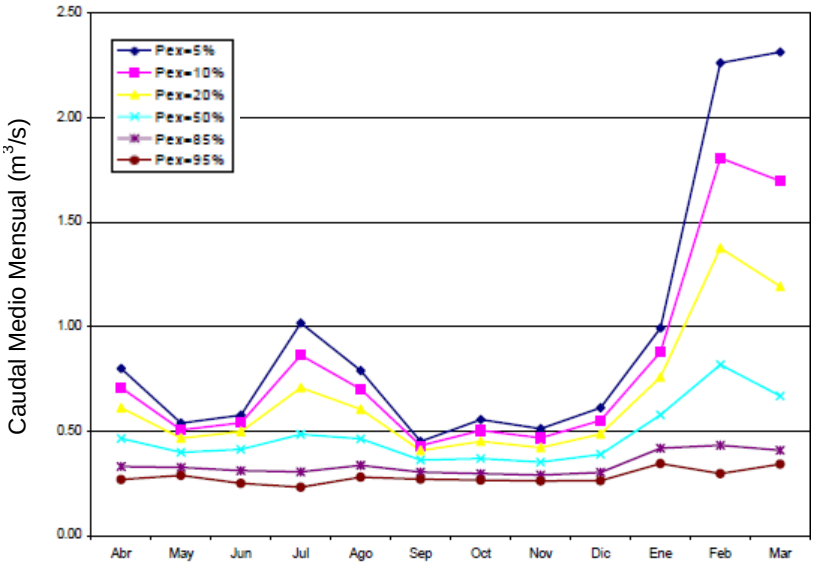
Por otra parte, CADE-IDEPE (2004) y Primas Ingeniería Ltda. (1992) presentan un estudio hidrológico a partir de la información fluviométrica disponible efectuando análisis de frecuencia sobre la estadística rellenada o extendida de cada estación, entregando como resultado las curvas de variación estacional de caudales medios mensuales para diferentes probabilidades de excedencia (Figura 1-26).

En la Tabla 1-4 se muestran los registros de caudales medio mensuales mínimos y máximos, y de caudal medio anual presentados en los principales antecedentes revisados. Donde se observa que los caudales medios mensuales mínimos y máximos, y el caudal medio anual son muy similares entre sí para los diferentes estudios.

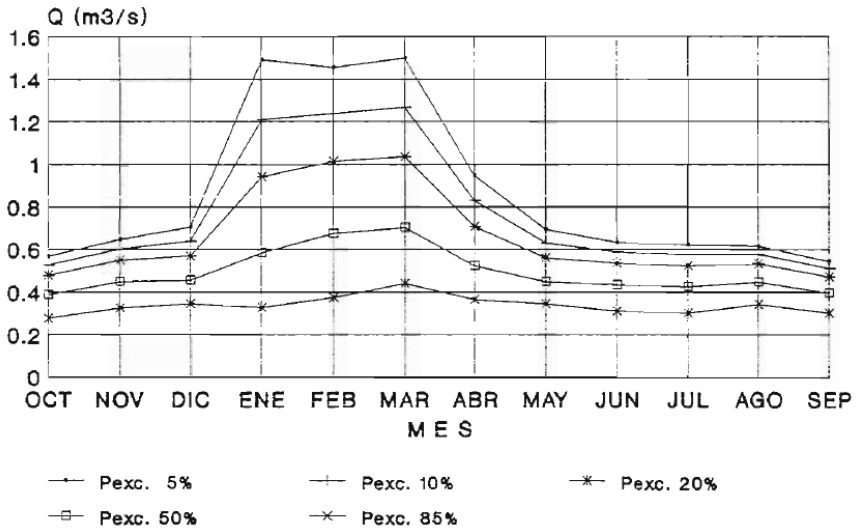
Tabla 1-4: Resumen de los datos fluviométricos en la estación río Colpitas en Alcérreca.

Referencia	Periodo de registro	Caudal medio mensual (m^3/s)		Caudal medio anual (m^3/s)
		Mínimo	Máximo	
UC (2012)	1982-2011	0,39	0,93	0,54
DITUC (2008)	1960-2008	0,38	0,92	0,52
CADE-IDEPE (2004)	1968-2000	0,36	0,99	0,53
Prisma Ingeniería Ltda. (1992)	1960-1990	0,39	0,79	0,52

Figura 1-26: Caudal medio mensual en la estación Colpitas en Alcérreca para diferentes probabilidades de excedencia.



Fuente: CADE-IDEPE (2004)



Fuente: Primas Ingeniería Ltda., 1992.

1.4.5 Calidad del Agua

La calidad del agua a lo largo del río Lluta es controlada en forma periódica a través de las estaciones de calidad que forman parte de la red de calidad de aguas superficiales de la DGA.

La calidad del agua del Lluta se ve alterada debido al alto contenido de compuestos existentes en la litología y los suelos, los cuales se incorporan al agua por mecanismos tales como acidificación del agua meteórica por CO_2 y SO_2 atmosférico, meteorización de las formaciones rocosa por intemperización, lixiviación superficial de rocas meteorizadas por escorrentía o derretimiento de nieve ácida, lixiviación de rocas subterráneas por contacto roca-agua infiltración acida.

En relación a los elementos químicos que se encuentran disueltos en el agua de la cuenca, el Boro presenta niveles que se presentan entre los 10 y 20 mg/L en los ríos Lluta y Quebrada Colpitas, sin embargo, en la Quebrada Caracarani este rango desciende a niveles que no superan los 5 mg/L.

La presencia de Boro en el agua superficial puede ser atribuible esencialmente a la existencia de depósitos de evaporitas de boratos en los salares altiplánicos y en el suelo, donde los boratos forman parte de la costra salina de estos. Además, cabe mencionar que en los depósitos de nitratos (caliches) existen concentraciones de Boro de consideración.

Al observar los niveles de Boro a lo largo del cauce principal de la cuenca se aprecia que las mayores concentraciones se tienen en desembocadura, lo que se puede explicar por el efecto de la intrusión salina.

Sobre la base de los indicado precedente se puede indicar que la parte alta de la cuenca está influenciada fuertemente por los factores volcánicos y los salares que adicionan contenido de metales e inorgánicos, y por lo tanto es posible indicar que el río Lluta y sus tributarios principales tienen una contaminación predominantemente de origen natural en que se presentan altos valores de Boro, Arsénico, y otros parámetros de terreno.

1.4.5.1. Antecedentes de Calidad del Agua

La DGA tiene dos estaciones de muestreo ubicadas en el río Colpitas en Alcérreca y en río Caracarani en Alcérreca, donde se mide ocasionalmente parámetros de calidad, y donde rutinariamente se toman registros de caudales.

Los datos entregados por la DGA contienen, entre otros, datos de Conductividad (mhos/cm), y pH para el período 2000-2009. También se consideraron datos adicionales de parámetros de calidad de agua se obtuvieron de informes que contienen

mediciones en las estaciones de la DGA mencionadas, y en otro punto de monitoreo (Lluta en Alcérreca) (DICTUC, 2008b; INGENDESA, 1993b).

Además, Energía Andina (2013) ha entregado información relevante de calidad de agua en los puntos de monitoreo que muestra la Tabla 1-5 y que se ubican en la Figura 1-27.

Tabla 1-5: Coordenadas de ubicación de los Puntos de Monitoreo de Calidad del Agua y mediciones de Aforo.

Punto de Monitoreo	Coordenada[1]		Altitud (m)
	E	N	
CP1	455.674	6.017.613	4.283
Ca1	455.974	6.016.457	4.318
Ca2	456.475	6.015.725	4.184
Ca3	455.395	6.015.760	4.169
Ca4	453.245	6.014.441	4.130
Ca5	452.216	6.014.122	4.125

1 Datum: WGS84.

En la Figura 1-28 se presenta los registros para el parámetro de pH, considerado como uno de los parámetros de calidad principales. Esta figura muestra el rango entre 5,5 y 9,0 en color verde que debe cumplir la calidad del agua según la NCh 1333 Of.78 Sección 6 (INN, 1978). Se observa que las estaciones de monitoreo Colpitas en Alcérreca y Lluta en Alcérreca en promedio cumplen el rango de la norma, y que la estación Caracarani en Alcérreca no cumple con el rango.

El pH no es un componente conservativo de la calidad del agua, dada su naturaleza reactiva ante las variables ambientales, por lo que no es posible obtener una relación simple entre el pH y el caudal en los puntos de monitoreo. El pH en la estación Colpitas en Alcérreca muestra bastante estabilidad y poca variabilidad (7,7 ±0,2), principalmente debido a la alta concentración de Boro (Figura 1-29) en forma de ácido bórico que forma un buffer.

El pH de la estación Caracarani en Alcérreca se explicaría por su clasificación como agua bicarbonatada según el diagrama Piper (Figura 1-30), ya que este tipo de aguas tienden a tener un pH más acídico. La alta variabilidad de pH en el punto Lluta en Alcérreca se explica pues este punto es una zona reactiva, donde la mezcla de aguas de distinta calidad no ha alcanzado el equilibrio necesario.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

435000 440000 445000 450000 455000 460000

8025000 8020000 8015000 8010000 8005000 8000000

COMUNA DE GENERAL LAGOS

COMUNA DE PUTRE

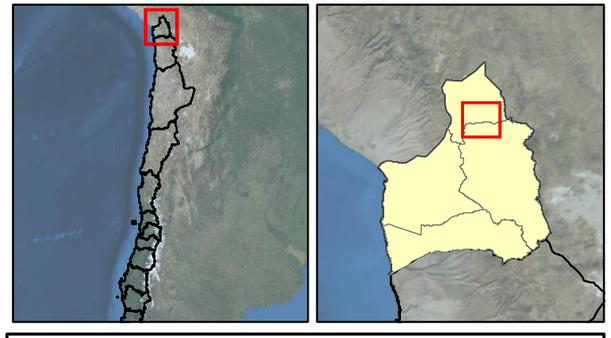
Río Colpitas

CP1 Ca1 Ca2 Ca3 Ca4 Ca5

Punto	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)
CP1	455874	8017613
Ca1	458974	8016457
Ca2	456475	8015725
Ca3	455395	8015760
Ca4	453245	8014441
Ca5	452218	8014122

Leyenda

- Punto de monitoreo
- Río
- Quebrada
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal



TITULO

Puntos de monitoreo de Energía Andina

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

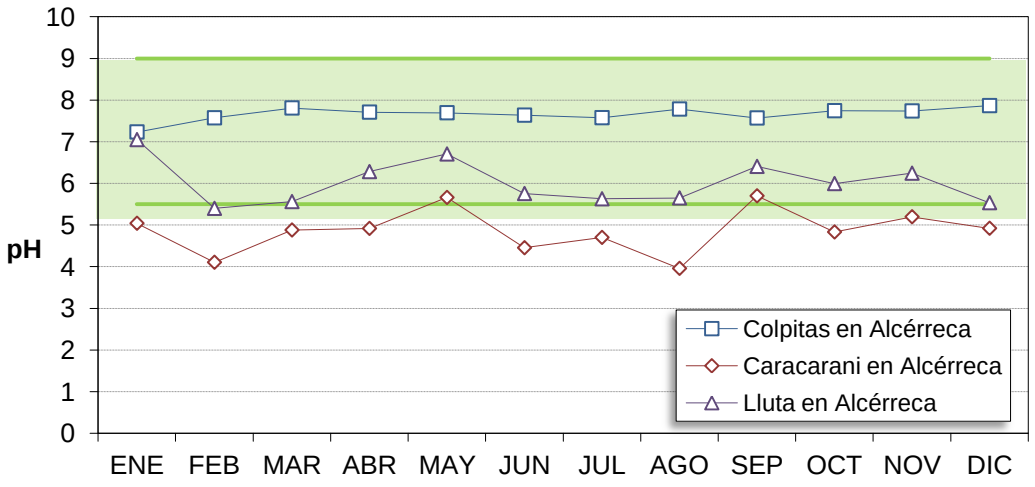
CLIENTE: Dirección General de Aguas

PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1:130.000	2 1 0 2 Km	1-27

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_1-27.mxd

Figura 1-28: Datos históricos de pH para la zona de confluencia Caracarani-Colpitas.

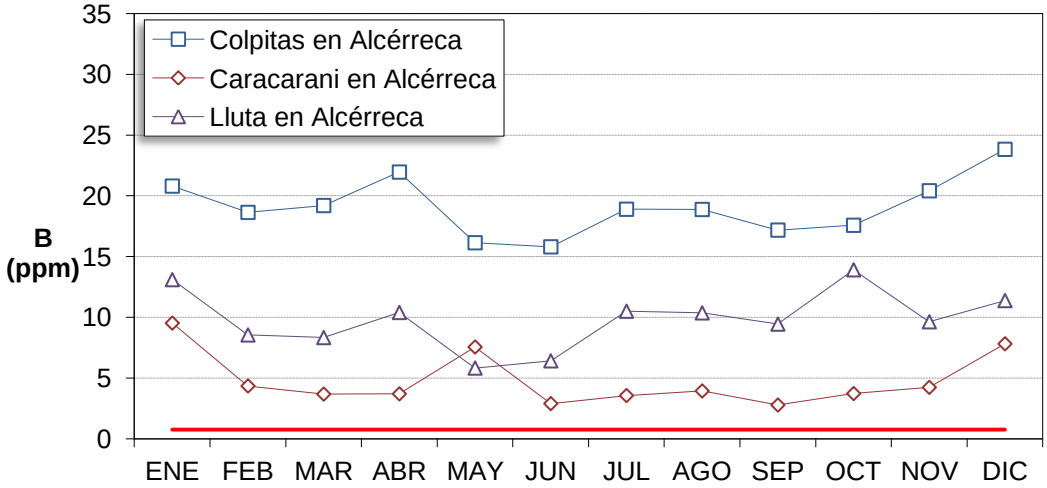


Fuente: Adaptado de datos DGA.

Uno de los parámetros de calidad importantes en el río Colpitas es el Boro, la norma de calidad NCh 1333 Of.78 Sección 6, indica un límite máximo de 0,75 mg/L (INN, 1978). La Figura 1-29 muestra que este valor límite indicado como una línea roja, es ampliamente superado en los tres puntos de monitoreo.

No se observa una tendencia temporal en los datos esperable para el aumento de caudal en temporada estival, lo que indica que la concentración de Boro es independiente del caudal, existiendo una fuente natural continua.

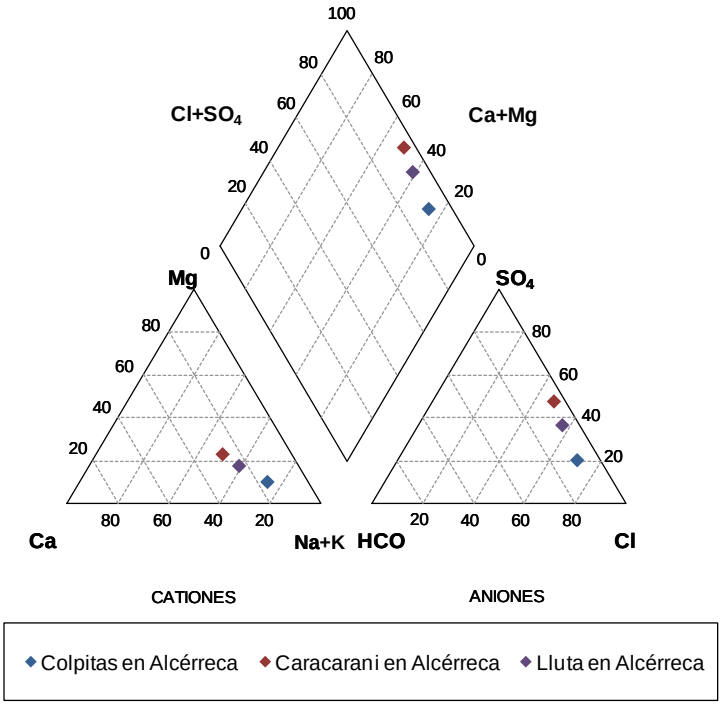
Figura 1-29: Datos históricos de Boro (mg/L) para la zona de confluencia Caracarani-Colpitas.



Fuente: Adaptado de datos DGA.

Según el diagrama de Piper para los datos históricos (Figura 1-30) las aguas del río Colpitas en Alcérreca y del río Lluta en Alcérreca son consideradas de tipo cloruradas-sódicas, por otra parte, el agua del río Caracarani en Alcérreca son consideradas cloruradas-magnésicas-cálcicas-sódicas, indicando que la mezcla es mucho más homogénea.

Figura 1-30: Diagrama Piper para antecedentes de Calidad del Agua



1.5 Objetivos y Alcances del Estudio

AMEC recoge los objetivos en la misma forma que están contenidos en los Términos de Referencia (Sección 4. Objetivos). Consecuentemente se define el objetivo general y los específicos a continuación.

1.5.1 Objetivo General

Caracterización de la naturaleza hidrográfica de la Quebradas de Colpitas y las fuentes de contaminación de las aguas existentes, ya sean superficiales, subterráneas o antropogénicas, estableciendo asimismo alternativas de infraestructura (obras) que permitan solucionar la problemática de calidad de agua en la cuenca.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la hidrología e hidroquímica de la Cuenca del Colpitas.
- Caracterizar los aspectos geoquímicos la cuenca.
- Identificar fuentes y procesos que aportan elementos químicos a las aguas.
- Caracterizar hidrogeológicamente la cuenca para identificar fuentes subterráneas según su calidad y fuentes que las afectan.
- Generar el modelo conceptual y matemático de la cuenca.
- Identificar alternativas de solución, como obras para el tratamiento de las aguas.
- Análisis de los perfiles técnicos de las alternativas de solución, con las respectivas valorizaciones técnicas y económicas de las metodologías de Mideplan, de evaluación de alternativas según la propuesta metodológica para el establecimiento de precios y subsidios en proyectos de embalses y obras hidráulicas anexas.

1.5.3 Alcances

El estudio que se presenta en este documento se refiere al Valle del río Colpitas, una de las subcuencas del Lluta, cuya caracterización de sus condiciones naturales y físicas resulta muy necesaria para el mejor manejo de los recursos hídricos de esta cuenca nortina de Chile.

Para su realización se consideraron los siguientes alcances de carácter general:

- La necesidad de que el estudio aporte información adicional a la existente basada en mediciones y monitoreo estacionales a lo largo de un año de trabajo experimental y de terreno, con un enfoque eminentemente multidisciplinario que permitiese un levantamiento integral del medio físico de la zona de estudio.

- El estudio se planteó desde una visión conceptual de las relaciones causa efecto y de la conformación estructural del valle de Colpitas, lo que le otorga una orientación científica y técnica a partir de la cual se puedan establecer conclusiones válidas para otros trabajos futuros.

- La participación de personal de terreno especializado en estas labores, con permanente supervisión de AMEC. Para ello se consideró subcontratar empresas de mediciones y laboratorios especializados de reconocido prestigio nacional e internacional, como asimismo que las tareas a realizar estuviesen sujetas a protocolos y procedimientos previamente aceptados por las partes.

- El valle de Colpitas está inmerso en un territorio con presencia indígena de carácter ancestral, lo que fue considerado desde el inicio del proyecto como un antecedente importante para su ejecución. Por ello se definió un proceso de involucramiento destinado a entregar información y solicitar cooperación para el buen desarrollo de las tareas de terreno.

- El estudio fue considerado desde su inicio como un trabajo de esencial importancia para el consultor, atendiendo al impacto de sus resultados y la necesidad de levantar información en un lugar donde no existían antecedentes previos de importancia. La realización del trabajo fue coordinada con la DGA de modo que se diera cumplimiento a las bases y se estableciese un clima de trabajo positivo para ambas partes.

- Se entiende que por ser el primer trabajo multidisciplinario de este valle, queden aspectos por cubrir, y que puedan ser objetos de estudios posteriores. En particular, este es el caso de los estudios hidrogeológicos, cuyo desarrollo se encuentra abordado conceptualmente a partir de los estudios geofísicos realizados en el lugar, sin embargo por la ausencia de pozos en el lugar requiere aún de trabajos adicionales.

El estudio ha abordado la mayoría de los elementos del medio físico del Colpitas, lo que permite un análisis global y detallado de las interrelaciones existentes, situación relevante en el entendimiento global de un sistema natural. Se estima que estos estudios deben ser la base de futuras acciones que permitan el mejor uso de los recursos existentes.

2.0 METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

2.1 Metodología General de Trabajo

Para el desarrollo de este estudio se propuso la ubicación preliminar de puntos de monitoreo de calidad del agua y suelo, los cuales fueron verificados a partir de una Campaña de Terreno realizados por especialistas entre los días 20 y 21 de febrero de 2013. Esta campaña de terreno consistió en realizar un recorrido desde la parte alta de la cuenca hasta la desembocadura del río Colpitas en el río Lluta. Como resultado, se realizó una inspección visual en las zonas alta y baja de la cuenca en estudio, se definió la ubicación de los puntos de muestreo.

Estas actividades permitieron iniciar un levantamiento y una interpretación preliminar de información con el objeto de avanzar hacia el entendimiento del sistema hídrico para cumplir el objetivo señalado. Además, permitieron definir una aproximación conceptual del sistema que forma la Cuenca del río Colpitas, aproximación que será abordada, desde el punto de vista heurístico, por aproximaciones progresivas del sistema, para así lograr un mejor conocimiento del mismo.

2.2 Calidad de Agua

2.2.1 Caracterización de la Calidad del Agua

Para una caracterización de la Calidad del Agua de la Cuenca del río Colpitas, se llevaron a cabo seis Campañas de Terreno, donde se midieron parámetros físico-químicos in situ y se muestreó agua para medir parámetros en laboratorio.

Las campañas de terreno se distribuyeron temporalmente en el año, para abarcar de la mejor manera un posible comportamiento estacional de la calidad del agua.

2.2.1.1. Agua para Riego

Se muestreó agua superficial y agua lluvia. Los puntos de monitoreo se seleccionaron de acuerdo con diferentes aspectos tales como: accesibilidad, ubicación de las borateras, e inspección inicial en terreno. Aplicando un tipo de muestreo heurístico a partir de la técnica de aproximaciones sucesivas, los puntos de monitoreo principales son los que muestra la Tabla 2-1 y la Figura 2-1.

Para determinar la calidad del agua del agua superficial y agua lluvia, se tomó como referencia los requisitos de calidad del agua para riego de la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978).

Tabla 2-1: Coordenadas de ubicación de los Puntos de Monitoreo de Calidad del Agua y mediciones de Aforo.

Punto de Monitoreo	Coordenada[1]		Altitud (m)
	E	N	
PM1	456462,64	8015716,99	4.166
PM2	451824,51	8013064,89	4.103
PM3	452346,47	8011811,48	4.091
PM4	451148,23	8011020,74	4.096
PM5	433563,43	8010226,39	3.640
PM6	433472,00	8011521,00	3.253
PM9	451545,00	8011585,00	4.085
Termal	455014,66	8014292,01	4.151

1 Datum: WGS84.

2.2.1.2. Agua para Consumo

Adicionalmente, y para verificar la calidad del agua que es consumida por los lugareños, se tomaron muestras de agua de consumo. Estas muestras se tomaron de forma más discreta (en solo 2 a 3 Campañas de Terreno), y provenían tanto de esteros, como de llaves de agua. La Tabla 2-2 y la Figura 2-2 muestran los puntos de monitoreo y sus coordenadas de ubicación.

Tabla 2-2: Coordenadas de ubicación de los puntos de monitoreo de la calidad del agua de consumo de los lugareños.

Punto de Monitoreo	Coordenada[1]		Altitud (m)
	E	N	
AP1	457252,00	8012389,00	4.245
AP2	457447,00	8014335,00	4.245
AP3	456702,00	8014998,00	4.206
AP4	458980,00	8016450,00	4.319
AP5	451333,00	8017340,00	4.265
AP6	452886,00	8016414,00	4.225

1 Datum: WGS84

Para determinar la calidad del agua de consumo de los lugareños, se usó como referencia la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005).

Los parámetros in situ corresponden a pH (u.a.), temperatura (°C), Conductividad Específica (CE, µmhos/cm), Oxígeno Disuelto (OD, mg/L), Turbiedad (NTU), y potencial redox (ORP, mV). Los parámetros para medir en laboratorio son los que se presentan en la Tabla 2-3 y que son los especificados en la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). Además de estos parámetros, la Tabla 2-4 muestra la selección de otros que aportan a una mejor descripción de la calidad del agua. Cabe destacar que a estos parámetros se le añadieron otros (como los mismos metales, pero disueltos), conforme las campañas fueron sucediéndose dado el carácter heurístico de la metodología principal de este proyecto.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

435000 440000 445000 450000 455000 460000

8025000 8020000 8015000 8010000 8005000 8000000

COMUNA DE GENERAL LAGOS

COMUNA DE PUTRE

0

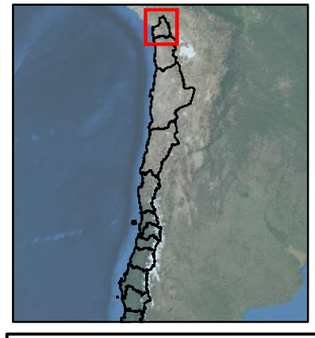
Río Colpitas

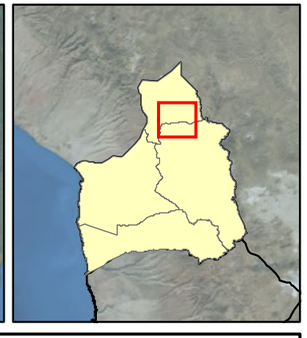
PM1
Termal
PM2
PM3
PM9
PM4
PM5
PM6

Punto	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)
PM1	456485	8015730
PM3	452346	8011811
PM2	451825	8013065
PM4	451148	8011021
PM5	433563	8010226
PM6	433472	8011521
PM9	451545	8011585
Termal	455220	8014654

Leyenda

- Punto de monitoreo
- Río
- Quebrada
- Bofedales
- Borateras
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal





TITULO

Puntos de monitoreo de calidad del agua y aforos

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

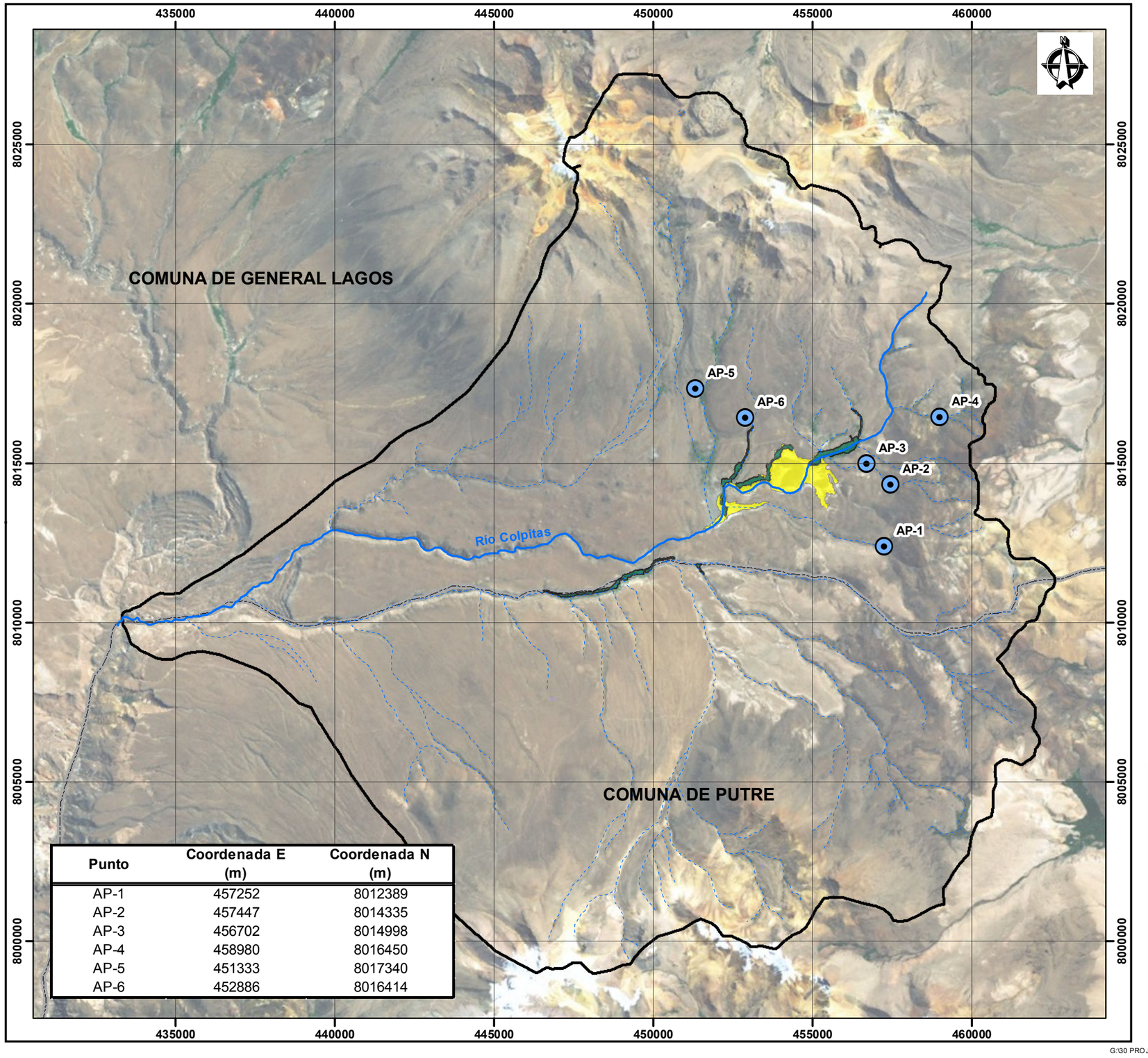
PREPARADO POR: amec

CLIENTE: Dirección General de Aguas

PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1:130.000	2 1 0 2 Km	2-1

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

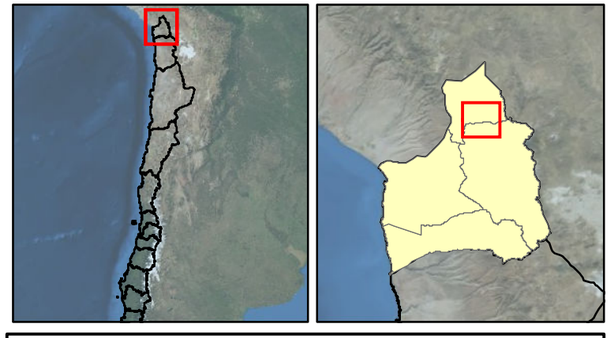
G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_2-1.mxd



Punto	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)
AP-1	457252	8012389
AP-2	457447	8014335
AP-3	456702	8014998
AP-4	458980	8016450
AP-5	451333	8017340
AP-6	452886	8016414

Leyenda

- Punto de agua de consumo
- Río
- Quebrada
- Bofedales
- Borateras
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal



TITULO

Puntos de monitoreo de la calidad del agua de consumo

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

CLIENTE: Dirección General de Aguas

PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1:130.000	2 1 0 2 Km	2-2

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_2-2.mxd

Tabla 2-3: Concentraciones máximas de elementos o compuestos químicos en agua para riego.

Elemento o compuesto	Unidad	Límite máximo
Aluminio (Al)	mg/L	5,00
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Bario (Ba)	mg/L	4,00
Berilio (Be)	mg/L	0,10
Boro (B)	mg/L	0,75
Cadmio (Cd)	mg/L	0,010
Cianuro (CN^-)	mg/L	0,20
Cloruro (Cl^-)	mg/L	200,00
Cobalto (Co)	mg/L	0,050
Cobre (Cu)	mg/L	0,20
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1000
CE (a 25°C)	µmhos/cm	**
Cromo (Cr)	mg/L	0,10
Fluoruro (F^-)	mg/L	1,00
Hierro (Fe)	mg/L	5,00
Litio (Li)	mg/L	2,50
Manganeso (Mn)	mg/L	0,20
Mercurio (Hg)	mg/L	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/L	0,010
Níquel (Ni)	mg/L	0,20
pH	(u.a.)	5,5-9,0*
Plata (Ag)	mg/L	0,20
Plomo (Pb)	mg/L	5,00
Selenio (Se)	mg/L	0,020
Sodio porcentual (Na)	%	35,00
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/L	**
Sulfato ($SO_4^=$)	mg/L	250,00
Vanadio (V)	mg/L	0,10
Zinc (Zn)	mg/L	2,00

* pH determinado en rango

** CE y SDT determinan clasificación de aguas para riego según su salinidad

Fuente: NCh 1333.Of78 (INN, 1978).

Tabla 2-4: Parámetros extras a la norma NCH 1333.Of78.

Elemento o compuesto	Unidad
Alcalinidad total (como $CaCO_3$)	mg/L
Amonio (NH_4^+)	mg/L
Bicarbonatos (HCO_3^-)	mg/L
Bromuro (Br^-)	mg/L
Calcio (Ca^{+2})	mg/L
Carbonatos ($CO_3^=$)	mg/L
Hidróxido (OH^-)	mg/L
Hierro (II) (Fe^{+2})	mg/L
Hierro (III) (Fe^{+3})	mg/L
Magnesio (Mg^+)	mg/L
Nitrato (NO_3^-)	mg/L
Nitrito (NO_2^-)	mg/L
Potasio (K^+)	mg/L
Sodio (Na^+)	mg/L
Sólidos Totales (ST)	mg/L
Sulfuro total ($S^=$)	mg/L

Los resultados de los análisis químicos de cada parámetro de todas las muestras de agua fueron comparados con los límites máximos (o rango en el caso de pH) permitidos, de a cuerdo a la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). Así se clasificaron las muestras de acuerdo a los parámetros de la norma NCh 1333.Of78 que estén dentro de los límites permitidos y cuáles no. También se clasificó el agua de acuerdo a la salinidad, comprendida como una concentración de CE o SDT siguiendo las recomendaciones de la NCh 1333.Of78 (INN, 1978) como muestra la Tabla 2-5.

Tabla 2-5: Clasificación de aguas para riego según su salinidad.

Clasificación	CE (µmhos/cm a 25°C)	SDT (mg/L)
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	CE≤750	SDT≤500
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	750<CE≤1500	500<SDT≤1000
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita métodos de manejo cuidadosos	1500<CE≤3000	1000<SDT≤2000
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	3000<CE≤7500	2000<SDT≤5000

Fuente: NCh 1333.Of78 (INN, 1978)

2.2.1.3. Clasificación Isotópica

Para caracterizar someramente el origen del agua superficial, se analizaron isótopos de Oxígeno-18 (^{18}O), Deuterio (^{2}H), y Tritio (^{3}H). Los valores relativos de la relación isotópica de los diferentes tipos de aguas se expresan en forma de desviaciones isotópicas (δ) en relación a la referencia VSMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water). Como referencia comparativa, se realiza el supuesto que la mayor parte de las precipitaciones que tienen lugar en nuestro planeta se sitúan alrededor de la Línea Mundial de las Aguas Meteóricas (LMAM) definida por Craig (1961) en la ecuación:

$$\delta D‰ = 8\ \delta^{18}O‰ + 10$$

Así, las aguas que han experimentado evaporación se sitúan a la derecha y por debajo de la LMAM.

La ocurrencia de ^{3}H en las precipitaciones permite su utilización como marcador en el ciclo hidrológico. Su contenido varía según se encuentre en las aguas oceánicas, superficiales, o subterráneas. La mayor cantidad de ^{3}H liberado en la atmósfera tuvo lugar durante los ensayos nucleares a partir de 1953 y en menor cantidad es liberado por la actividad de la industria nuclear.

El contenido de ^{3}H en las precipitaciones anteriores a 1952 era del orden 10 U.T., durante los ensayos nucleares de 1961-1962 ese contenido se elevó hasta alcanzar 10.000 U.T. A partir de la moratoria establecida en 1968 el contenido de ^{3}H

atmosférico disminuyó. El contenido de ^{3}H en agua subterránea puede interpretarse como sigue:

- <3 U.T.: agua cuya recarga ocurrió hace más de 20 años (respecto de 1972), típico de acuíferos confinados. Los acuíferos freáticos pueden poseer bajos contenido de ^{3}H debido a muy ligera infiltración (regiones áridas o semi-áridas), o a un largo período de percolación (baja trasmisividad, gran profundidad del nivel freático; estratificación de edades de agua por debajo del nivel freático).

- 3-20 U.T.: agua cuya recarga procede fundamentalmente del primer período de los ensayos nucleares (1954-1961).

- >20 U.T.: aguas de origen reciente.

2.2.2 Procedimiento de Muestreo en Terreno

El muestreo de aguas fue realizado por personal técnico del laboratorio SGS Chile Ltda. El procedimiento de muestreo se realizó en aguas superficiales directamente desde el flujo de agua, y en agua lluvia con una unidad de muestreo de MPS modificada. Los procedimientos de técnicas de muestreo y preservación de las muestras se basan en las normas NCh 441/2.Of96 (INN, 1996a), NCh 411/6.Of98 (INN, 1998), y NCh 411/3.Of96 (INN, 1996b).

En terreno, el personal técnico del laboratorio SGS tuvo las siguientes tareas:

- Preparación de materiales para mediciones de parámetros in situ, toma, almacenamiento, y envío de muestras.

- Verificación de la ubicación física de los puntos de muestreo.

- Toma de muestras, mediciones de aforo, y medición y registro de parámetros in situ.

- Envío de muestras al laboratorio en Santiago. El envío se realizó diariamente por sistema Courier de transporte terrestre.

2.2.2.1. Procedimiento para Mediciones de Parámetros In Situ

1. Revisar el buen estado de las sondas de medición de pH, temperatura, CE, OD, y ORP. Revisar que el equipo de tenga batería con carga y que los conectores de conexión a las sondas estén en buen estado.

2. Revisar que las disoluciones de almacenamiento de sondas estén disponibles y en buenas condiciones. Usarlas cada vez que guarde las sondas.

3. Calibrar diariamente las sondas de medición de pH, temperatura, CE, OD, y ORP, usando los estándares indicados por el manual de cada sonda.

4. Medir los parámetros in situ de una muestra en un recipiente de 1 L limpio, enjuagado tres veces con muestra, y con cantidad de muestra suficiente para sumergir cada sonda de medición.

5. Esperar a la estabilización de los parámetros y registrar los valores en la Cadena de Custodia.

2.2.2.2. Procedimiento de Muestreo de Agua Superficial

1. Tomar la muestra a contra corriente, en el centro de la fuente de agua y a 30 cm (cuando fue posible) de la superficie, sin llegar al fondo (por posible contaminación con partículas). Sumergir un balde, enjuagar tres veces, y tomar un volumen no menor a 3 L de muestra.

2. Medir parámetros in situ.

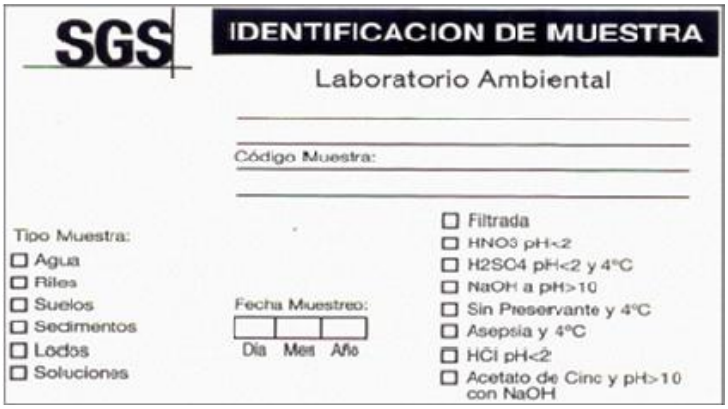
3. Llenar completamente la cantidad de envases limpios necesarios para todos los análisis, enjuagando con muestra tres veces cada envase.

4. Preservar cada envase de acuerdo a los análisis a realizar. Si los envases contienen preservantes, no enjuagarlos con muestra

5. Revisar que cada envase quede correctamente cerrado con contratapa y tapa.

6. Etiquetar cada envase con el nombre de la muestra y el tipo de preservación que posee. La Figura 2-3 muestra la etiqueta de identificación de muestra usada por SGS.

Figura 2-3: Etiqueta para identificación de muestra usada por SGS.



Fuente: SGS, 2013

7. Guardar los envases etiquetados en una caja aislante o *cooler* con hielo. Registrar en la Cadena de Custodia la cantidad de envases y muestra de cada punto.

2.2.2.3. Procedimiento de Muestreo de Agua Lluvia

1. Se usaron unidades de muestreos de MPS modificados como la de la Figura 2-4, pero con recipiente de plástico para recolectar el agua lluvia. Las unidades de muestreo de MPS modificado se instalan en cada punto de muestreo previo a un evento de tormenta.

Figura 2-4: Unidad de muestreo de MPS.

Fuente: SGS, 2013

2. Inmediatamente finalizada la tormenta, tomar la muestra desde la unidad para medición de parámetros in situ.

3. Registrar fecha de toma de muestra, volumen medido, y datos de la tormenta.

4. Cuando el volumen medido sea mayor a 20,0 mm de precipitación, recolectar muestra para ser analizada en el laboratorio.

5. Etiquetar cada envase con el nombre de la muestra y el tipo de preservación que posee. La Figura 2-3 muestra la etiqueta de identificación de muestra usada por SGS.

6. Guardar los envases etiquetados en una caja aislante o *cooler* con hielo. Registrar en la Cadena de Custodia la cantidad de envases y muestra de cada punto.

En terreno, el personal de AMEC tuvo las siguientes tareas:

- Revisar que el personal de SGS contaba con los equipos para medición de parámetros in situ y con materiales de muestreo.

- Verificar la calibración correcta de los equipos para medición de parámetros in situ.

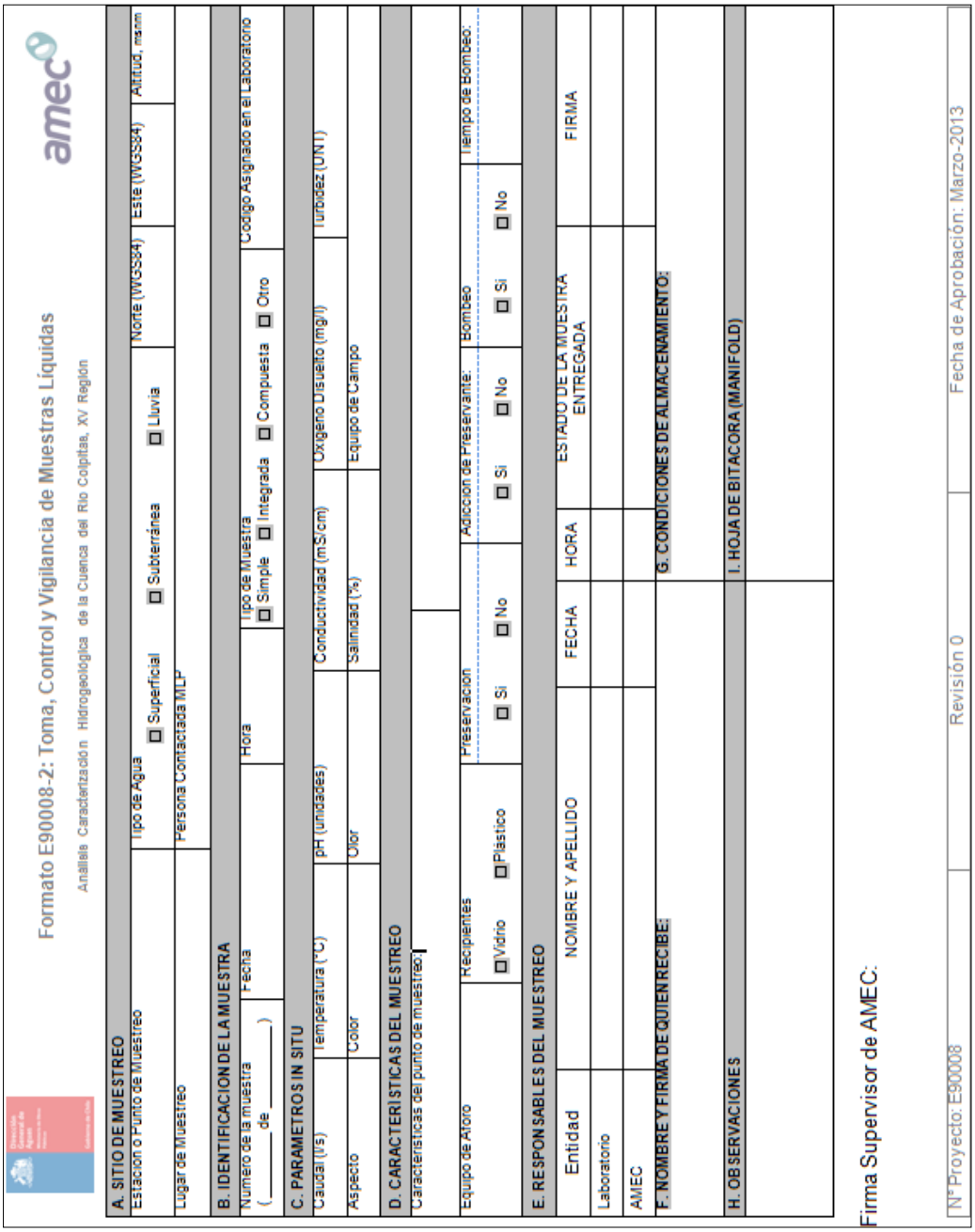
- Supervisar la técnica de toma de muestra.

- Verificar la cadena de custodia en todo momento.

- Tomar fotografías en cada uno de los puntos de muestreo.

- Registrar datos de mediciones de aforo, calidad in situ y otras observaciones del entorno, datos de georreferenciación del sitio de muestreo, criterios de decisión del sitio escogido, y otros en el formato E90008-2, E90008-2a o E90008-2b en la Figura 2-5, Figura 2-6, y Figura 2-7 respectivamente.

Figura 2-5: Formato E90008-2: Toma, Control y Vigilancia de Muestras Líquidas.



Formato E90008-2: Toma, Control y Vigilancia de Muestras Líquidas

Analisis Caracterizacion Hidrogeologica de la Cuenca del Rio Colpitas, XV Region

A. SITIO DE MUESTREO											
Estacion o Punto de Muestreo		Tipo de Agua	☐ Superficial	☐ Subterránea	☐ Lluvia			Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Altitud, msnm	
Lugar de Muestreo		Persona Contactada MOP									
B. IDENTIFICACION DE LA MUESTRA											
Numero de la muestra (_____ de _____)	Fecha	Hora	Tipo de Muestra ☐ Simple ☐ Integrada	☐ Compuesta	☐ Otro	Codigo Asignado en el Laboratorio					
C. PARAMETROS IN SITU											
Caudal (l/s)	Temperatura (°C)	pH (unidades)	Conductividad (mS/cm)	Oxigeno Disuelto (mg/l)	Turbidez (UNT)						
Aspecto	Color	Olor	Salinidad (%)	Equipo de Campo							
D. CARACTERISTICAS DEL MUESTREO											
Caracteristicas del punto de muestreo:											
Equipo de Aforo	Recipientes ☐ Vidrio ☐ Plastico	Preservacion ☐ Si ☐ No		Adicion de Preservante: ☐ Si ☐ No	Bombeo ☐ Si ☐ No	Tiempo de Bombeo:					
E. RESPONSABLES DEL MUESTREO											
Entidad	NOMBRE Y APELLIDO		FECHA	HORA	ESTADO DE LA MUESTRA ENTREGADA			FIRMA			
Laboratorio											
AMEC											
F. NOMBRE Y FIRMA DE QUIEN RECIBE:				**G. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO:**							
H. OBSERVACIONES				**I. HOJA DE BITACORA (MANIFOLD)**							

Firma Supervisor de AMEC:

N° Proyecto: E90008 | Revisión 0 | Fecha de Aprobación: Marzo-2013

Figura 2-6: Formato E90008-2a: Ficha de Registro de Aforo (Molinete).

Formato E90008-2a: Ficha de Registro de Aforo

Análisis Caracterización Hidrogeológica de la Cuenca del Río Colpitas, XV Región

FICHA N° _____

Punto Aforo: _____

Fecha: _____

Hora Inicio: _____

Hora Fin: _____

Coordenadas UTM (Datum Sirgas WGS 84)

Coord. N: _____

Coord. E: _____

Elev.: _____ m snm

Método de Aforo: □ molinete
□ vertedero

Calibración Molinete:

Velocidad = _____ · N° vueltas/seg + _____ (m/s) si N < ____

Velocidad = _____ · N° vueltas/seg + _____ (m/s) si N > ____

N

Croquis de Ubicación

REGISTRO DE AFORO (MOLINETE)

Sección	0,2 H (vueltas/s)				Lectura a 0,6 H (vueltas/s)				Lectura a 0,8 H (vueltas/s)				Lmed	Vmed	H	B	A	Q
	L_1	L_2	L_3	L	L_1	L_2	L_3	L	L_1	L_2	L_3	L	(N°/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m^2)	(m^3/s)
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
																	Σ =	

Observaciones: _____

Firma Supervisor AMEC: _____

Firma Personal de Laboratorio: _____

Figura 2-7: Formato E90008-2b: Ficha de Registro de Aforo (Vertedero).

Formato E90008-2b: Ficha de Registro de Aforo

Análisis Caracterización Hidrogeológica de la Cuenca del Río Colpitas, XV Región

FICHA N° _____

Punto Aforo: _____

Fecha: _____

Hora Inicio: _____

Hora Fin: _____

Coordenadas UTM (Datum Sirgas WGS 84)

Coord. N: _____

Coord. E: _____

Elev.: _____ m snm

Método de Aforo: □ molinete
□ vertedero

Calibración Vertedero:

Coeficiente de Gasto: _____

Geometría Vertedero: Ancho ____ (m) Alto ____ (m)

Ángulo _____ ° Otro _____

N

Croquis de Ubicación

Esquema Vertedero:

REGISTRO DE AFORO (VERTEDERO)

Altura de Agua: _____

Observaciones: _____

Firma Supervisor AMEC: _____

Firma Personal de Laboratorio: _____

2.2.3 Verificación de la Exactitud de los Análisis

La verificación de la exactitud de los análisis se realiza para verificar que el laboratorio ha entregado resultados de laboratorio que son técnicamente válidos dado el control de calidad propio. La verificación de la exactitud de los análisis se puede hacer sobre muestras que tienen un completo análisis, que incluye pH, CE, SDT, y cationes y aniones mayoritarios.

La verificación de la exactitud de los análisis realizada para todos los datos incluidos en este informe son cinco: verificación por análisis de balance iónico, verificación por comparación de de SDT_{medido} vs $SDT_{calculado}$, verificación por comparación de CE y $\sum$iones, verificación por comparación de $SDT_{calculado}$ vs CE, y verificación por comparación de SDT_{medido} vs CE (APHA, 1999).

Todos estos criterios, si bien son generales, tienen rangos de aceptación de la verificación que dependen de la composición química específica de cada muestra, e.g. si una muestra de agua contiene cantidades importantes de nitrato, y otra muestra no, entonces las especies de aniones aportantes en cada muestra serán distintas.

2.2.3.1. Verificación por Análisis de Balance Iónico

La suma de equivalentes de aniones y cationes debería ser cero, ya que el agua es eléctricamente neutra. El balance iónico se calcula como el porcentaje de la razón entre aniones y cationes expresados como meq/L. La ecuación que se usa es la siguiente:

$$BI\ (\%) = 100 \times \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

El criterio de aceptación viene dado por la Tabla 2-6:

Tabla 2-6: Criterios de aceptación del análisis de validación de datos de balance iónico.

$\sum$ **aniones (meq/L)**	**Diferencia Aceptable**
0-3,0	± 0,2 (meq/L)
3,0-10,0	± 2%
10,0-800	± 5%

Fuente: APHA, 1999

Un equivalente de un compuesto o elemento químico en el balance iónico tiene que ver con la carga de la especia y su masa molar, teniendo como ejemplo el carbonato, se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{meq_{CO_3^=}}{L} = \underbrace{\frac{mg_{CO_3^=}}{L}}_{\text{Resultado de laboratorio}} \div \underbrace{\frac{60{,}01g}{mol}}_{\text{Masa Molar } CO_3^=} \times \underbrace{\frac{2\ eq}{mol}}_{\text{Carga equivalente por mol}}$$

2.2.3.2. Verificación por Comparación de SDT_{medido} vs $SDT_{calculado}$

Los SDT_{medido} deberían ser mayores que los $SDT_{calculado}$, pues alguna contribución podría no ser tomada en cuenta. Los $SDT_{calculado}$ tienen en cuenta los iones mayoritarios, siguiendo la ecuación:

$$SDT_{calculado} = 0{,}6 \times (\text{alcalinidad}) + Na^+ + K^+ + Ca^{+2} + Mg^{+2} + Cl^- + SO_4^{-2} + SiO_3^{-2} + NO_3^- + F^-$$

Si el valor de SDT_{medido} es menor al de $SDT_{calculado}$, entonces uno de los iones tiene una concentración sospechosa y la muestra debe ser analizada otra vez. Un rango de error aceptable es el que se muestra a continuación:

$$1{,}0 < \frac{SDT_{medido}}{SDT_{calculado}} < 1{,}2$$

2.2.3.3. Verificación por Comparación de CE y ∑ iones

La suma de aniones y cationes, separadamente, deben ser un centésimo del valor de CE. Si alguna de las sumas no cumple este criterio, el análisis es sospechoso y la muestra debe ser reanalizada. El criterio aceptable es así:

$$100 \times \sum \text{aniones (o cationes) (meq/L)} = (0{,}9\text{-}1{,}1)\ CE$$

2.2.3.4. Verificación por Comparación de $SDT_{calculado}$ vs CE

Si la tasa $SDT_{calculado}$/CE cae por debajo de 0,55 la suma de iones de menor valor es sospechosa, y por ende la muestra debe ser reanalizada para estos iones. Si el análisis vuelve a dar valores similares, quiere decir que alguna contribución (e.g. amonio o nitrato) no está siendo considerada. Si hay Calcio o sulfato pobremente disociados, la tasa $SDT_{calculado}$/CE puede ser de hasta 0,8. Es criterio aceptable es así:

$$\frac{SDT_{calculado}}{CE} = 0{,}55\text{-}0{,}7$$

2.2.3.5. Verificación por Comparación de SDT_{medido} vs CE

Este criterio es aceptable dentro de los mismos rangos anteriores. Si la tasa cae por fuera de los rangos, entonces los valores de SDT_{medido} o CE son sospechosos y deben ser reanalizados.

2.2.4 Análisis Estadístico de los Datos Históricos y de los Datos Generados en las Campañas de Terreno AMEC para la Calidad del Agua

Debido a la gran variedad de información, tanto en fuentes de información, tipo de información, cantidad de datos, periodicidad de los datos, calidad de los datos, tipos de análisis, estacionalidad de los datos, etc., es necesario hacer un análisis estadístico de los datos, que permita tener la confianza analítica de trabajar con datos estadísticamente válidos.

Para el análisis estadístico se eligieron las técnicas de eliminación de datos (APHA, 1999) y de Análisis de Varianza de un Factor (o ANOVA de un factor). Estas técnicas permiten eliminar valores espurios o que están fuera de una agrupación normal de datos, para luego comparar dos o más series de datos normales y así discriminar la dependencia de hipótesis nula (i.e. si las series de datos normales dependen de una sola condición o factor comparado).

2.2.4.1. Eliminación de Datos

Los parámetros históricos de de calidad de agua en las estaciones de la DGA río Colpitas en Alcérreca, Caracarani en Alcérreca, y Lluta en Alcérreca se obtuvieron desde diferentes fuentes (INGENDESA, 1993b; DICTUC, 2008b), por lo que la agrupación de datos no es normal y tienen una alta variación. Para evitar usar datos con valores sospechosamente altos o bajos, se eliminaron aquellos que estadísticamente se calificaron como espurios.

Existen datos de mediciones mensuales esporádicas desde 1956 de los parámetros de calidad Arsénico (mg/L), bicarbonato (mg/L), Boro (mg/L), Calcio (mg/L), carbonato (mg/L), cloruro (mg/L), Cobre (mg/L), CE (µS/cm), Hierro (mg/L), Magnesio (mg/L), pH (u.a.), Potasio (mg/L), Sodio (mg/L), y sulfato (mg/L).

Para eliminar datos espurios se necesitó el valor menor (x_L), el mayor (x_H), el promedio ($\bar{x}$), y la desviación estándar (s) de cada uno de los parámetros de calidad. Luego se calcularon los estadísticos T_L y T_H:

$$T_L = \frac{(\bar{x}-x_L)}{s} \text{ para valores sospechosamente bajos}$$

$$T_H = \frac{(x_H - \bar{x})}{s}$$ para valores sospechosamente altos

Luego, ambos valores se compararon con el valor de $T_{crítico}$ de la Tabla 2-7, dependiendo del número total de datos (n), y con un 5% de significancia (p = 0,95). Si el valor de los estadísticos T_L o T_H superaron el de la Tabla 2-7, entonces el dato es un espurio y fue eliminado.

Tabla 2-7: Valores de $T_{crítico}$ para un nivel de significancia de 1% o 5% para datos alterados de un muestreo normal.

n	Nivel de significancia	
	1%	5%
3	1,15	1,15
4	1,49	1,46
5	1,75	1,67
6	1,94	1,82
7	2,10	1,94
8	2,22	2,03
9	2,32	2,11
10	2,41	2,18
12	2,55	2,29
14	2,66	2,37
15	2,71	2,41
16	2,75	2,44
18	2,82	2,50
20	2,88	2,56
30	3,10	2,87
40	3,24	2,87
50	3,34	2,96
60	3,41	3,03
100	3,60	3,21
120	3,66	3,27

Fuente: APHA, 1999

2.2.4.2. ANOVA de un Factor

Este análisis se aplica grupos de datos normales cuando se quiere discriminar un factor de dependencia en una hipótesis nula. En este estudio se verificó si existe diferencia significativa o no entre los datos históricos y los de las Campañas de Terreno.

Se realizaron seis tipos de análisis de ANOVA de un factor, uno para cada tipo de agrupación de datos que debe ser comparada:

1. Para cada punto de monitoreo, se compararon entre sí los datos de las Campañas de Terreno de AMEC, para verificar si existen diferencias entre las distintas campañas para un mismo punto de monitoreo.

2. Para los datos del análisis isotópico de los puntos de monitoreo de la Campaña de Terreno N°1.

3. Para los datos de la Campaña de Terreno N°2, se compararon los pares de muestras PM5 y PM7, y PM6 y PM8, que son duplicados analíticos, para realizar un control de calidad desde la toma de muestra hasta los resultados de los análisis de laboratorio.

4. Para los puntos de monitoreo PM5 y PM6, se agruparon los datos históricos ordenados alfabéticamente por parámetro y se compararon con los correspondientes de las Campañas de Terreno AMEC, para verificar si existe diferencia entre los datos históricos de INGENDESA (1993b) y DICTUC (2008b), y los de las Campañas de Terreno.

5. Para los datos de las campañas de terreno de Energía Andina (2013), para cada punto de monitoreo, y así poder integrar estos datos al análisis de la calidad del agua.

6. Para los puntos de monitoreo en común de los datos de Energía Andina (2013) y este proyecto, que corresponden a Ca1 Minaza y Ca2 Cuiba Jabira con los puntos AP4 y PM1 respectivamente.

El ANOVA de un factor se realizó en el programa Excel (Microsoft, 2007) con $\alpha = 0,05$ ($p = 0,95$) de significancia. El análisis entrega el estadístico F, que se compara con el valor de F crítico; si el valor del estadístico F supera al de F crítico entonces la hipótesis de comparación es nula y si existe diferencia significativa.

2.2.5 Diagramas Hidroquímicos

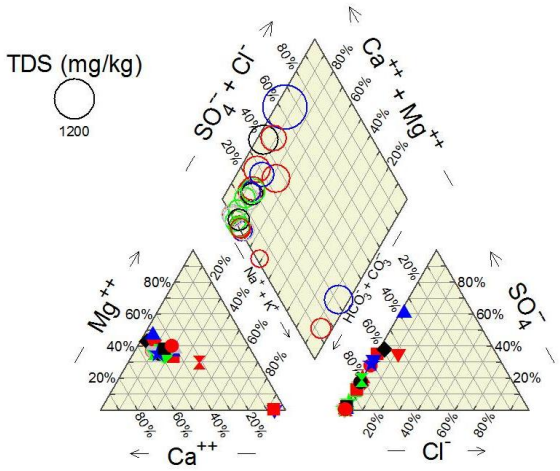
Los diagramas hidroquímicos son herramientas gráficas que permiten una mejor visualización de los datos, facilitando la interpretación y comparación de los datos. Los diagramas hidroquímicos que ayudan a un mejor entendimiento de los datos, son los diagramas de Piper (1944), de Stiff (1951), y los diagramas de dispersión.

Los diagramas de Piper y de Stiff incorporan los datos de los aniones y cationes mayoritarios, mientras que en los diagramas de dispersión es posible hacer comparaciones de otros parámetros. Los diagramas de Piper y de Stiff fueron realizados en el programa The Geochemist's Workbench (Aqueous Solutions LLC, 2012), y los diagramas de dispersión fueron realizados con el programa Excel (Microsoft, 2007).

2.2.5.1. Diagramas de Piper

Este tipo de diagramas es una representación gráfica de la composición de aniones y cationes mayoritarios, expresados como meq/L, de una o varias muestras de agua. La Figura 2-8 muestra que el diagrama de Piper se compone de tres partes: dos diagramas ternarios, uno para cationes (Calcio, Magnesio, y Sodio más Potasio), y uno para aniones (cloruro, sulfato, y carbonato más bicarbonato); y una proyección en diamante de los diagramas ternarios.

Figura 2-8: Diagrama de Piper para una muestra ejemplo.

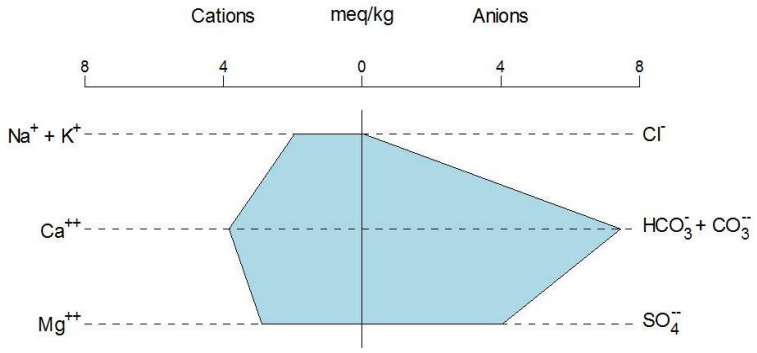


Fuente: Aqueous Solutions LLC, s.f.

2.2.5.2. Diagramas de Stiff

Este tipo de diagramas es una representación gráfica de la composición de aniones y cationes mayoritarios, expresado como meq/L, de una muestra de agua. La Figura 2-9 muestra que el diagrama de Stiff se compone de un eje horizontal, donde a la izquierda se grafican concentraciones de cationes (Sodio más Potasio, Calcio, y Magnesio) y a la derecha de aniones (cloruro, bicarbonato más carbonato, y sulfato) uniendo las aristas de estos puntos y formando un polígono. Las variaciones de las formas de los polígonos definen distintas clasificaciones de agua de cada muestra.

Figura 2-9: Diagrama de Stiff para una muestra ejemplo.



Fuente: Aqueous Solutions LLC, s.f.

2.3 Calidad de Suelo y Sedimentos

El muestreo de suelo en la cuenca en estudio tiene como objetivo identificar la presencia y la concentración de compuestos químicos en el suelo, asociados a la presencia de éstos en el agua del río Colpitas y sus afluentes, siendo el principal objetivo el estudio del Boro.

El análisis realizado consideró también las características físicas del suelo en profundidad, especialmente a la clase textural y a la conformación de horizontes del suelo mineral y orgánico según sea el caso, ya que por la ubicación y el origen de los suelos, se definió que, probablemente, la fracción mineral estaría constituida por texturas gruesas, poco reactivas, lo que implica fácil lavado de sales (entre otros elementos) que puedan acumularse durante períodos de baja precipitación.

2.3.1 Selección de Puntos de Muestreo

Mediante imágenes satelitales se realizó una preselección de puntos representativos a lo largo de la caja del río, los que posteriormente y en conjunto con propietarios de las estancias existentes en Colpitas se realizó una la visita de factibilidad, considerando

fundamentalmente acceso y, por otra parte, la dificultad de hacer calicatas para lo cual se descartaron aquellos sectores rocosos.

Aquellos puntos que no cumplieron con las condiciones físicas necesarias fueron descartados, reubicándose las calicatas en aquellas áreas representativas y cercanas al punto preliminarmente seleccionado. La ubicación de las calicatas se muestra en la Tabla 2-8 y la Figura 2-10.

Tabla 2-8: Coordenadas de ubicación de las calicatas.

Calicata	Coordenadas[1]		Altitud (m)
	E	N	
C0	433.074	8.010.608	3.611
C1	433.496	8.010.176	3.610
C2	451.447	8.011.866	4.078
C3	450.973	8.012.761	4.100
C4	452.688	8.013.644	4.118
C5	451.574	8.014.746	4.147
C6	452.219	8.014.341	4.121
C7	455.201	8.014.649	4.148
C8	454.462	8.015.246	4.153
C9	456.432	8.015.723	4.180
C10	455.415	8.014.818	4.154

1 Datum: WGS84.

La identificación de los puntos de ubicación de las calicatas se inició en el sector la junta entre el río Colpitas y el río Caracarani, partiendo desde la Calicata C0, hasta la parte alta de la cuenca, cercana al nacimiento del río de interés, en la localidad de Colpitas, terminando en la calicata C9–C10.

Una vez finalizada la etapa de selección, se realizó la visita de intervención para cuya ejecución se contó con apoyo de personal subcontratado, quienes realizaron las calicatas manualmente (pala), de modo que la intervención en los terrenos fuese la mínima posible. La distribución de los puntos de muestreo seleccionados según se expuso en la metodología se presenta en la Figura 2-10.

Calicata	Este	Norte
Calicata 1	433576	8010195
Calicata 2	449783	8012228
Calicata 3	450160	8011969
Calicata 4	452497	8013582
Calicata 5	451587	8014119
Calicata 6	453745	8014503
Calicata 7	455021	8014643
Calicata 8	454284	8015338
Calicata 9	455237	8015294
Calicata 10	455189	8014162

435000 440000 445000 450000 455000

8025000 8020000 8015000 8010000 8005000

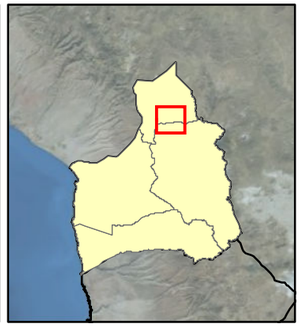
COMUNA DE GENERAL LAGOS

COMUNA DE PUTRE

Calicata 1
Calicata 2
Calicata 3
Calicata 4
Calicata 5
Calicata 6
Calicata 7
Calicata 8
Calicata 9
Calicata 10

Leyenda

- Calicata
- Río
- Quebrada
- Bofedales
- Borateras
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal



TITULO

Puntos de Monitoreo de Suelos

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1:100.000	2 1 0 2 Km	**2-10**

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_2-10.mxd

2.3.2 Descripción de Calicatas

Con la finalidad de estudiar en detalle el área de interés se realizó una visita a terreno entre el 3 y 5 de septiembre de 2013, con el objeto de conocer las características de los suelos a través de calicatas. La profundidad de trabajo fue variable, entre 25 y 100 cm, definida por factibilidad de profundidad de excavación mediante el método manual.

La descripción de cada perfil se realizó con el apoyo de Tabla Munsell, huincha de medir, cámara fotográfica, cuchillo; adaptando además parte del método descriptivo indicado en “Soil Survey Manual” (Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture).

2.3.3 Determinación de Granulometría

El análisis de la granulometría se realizó en laboratorio acreditado Testcontrol Ltda., en la ciudad de Arica. Para la determinación se consideró la metodología que determina la Norma 8.102.1 (MC-V8, 2012) (LNV 105) Suelo–Método para determinar granulometría.

Para determinar el tamaño de partículas se consideró dentro de la batería de tamices, la serie ASTM indicada en las Tabla 2-9 y Tabla 2-10.

Tabla 2-9: Tamices ASTM por N° y sus diámetros en mm.

Criba-tamiz ASTM	Abertura nominal (mm)
N° 200	0,075
N° 100	0,150
N° 50	0,300
N° 40	0,425
N° 30	0,600
N° 10	2,00
N° 8	2,36
N° 4	4,75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-10: Tamices ASTM por pulgadas y sus diámetros en mm.

Criba-tamiz ASTM	Abertura nominal (mm)
3/8´´	9,5
1/2´´	12,5
3/4´´	19,0
1´´	25,0
1 1/2´´	37,5
2´´	50
2 1/2´´	63
3´´	75

Fuente: Elaboración propia

2.3.4 Muestreo y Análisis de Laboratorio

2.3.4.1. Colecta de la Muestra

Dado el objetivo de la caracterización de los suelos, las muestras destinadas a laboratorio fueron de carácter superficial, recolectadas en el rango de 0 a 20 cm de profundidad.

La muestra fue tomada mediante una pala de jardín, recolectándose alrededor de 1 kg de material, depositado en una bolsa hermética autosellante y posteriormente, almacenada temporalmente en un contenedor tipo *cooler*.

En terreno, luego de la recolección, las muestras fueron entregadas a personal de SGS quienes fueron los encargados de su envío, vía aérea, al laboratorio de análisis ubicado en la ciudad de Santiago, para lo cual consideraron el protocolo de cadena de custodia respectivo.

2.3.4.2. Análisis de Laboratorio

Los análisis de laboratorio realizados a las muestras de suelo, corresponden a los indicados en la Tabla 2-11.

Por otra parte, con la finalidad de comparar los valores obtenidos con un parámetro de referencia basado en tolerancia de cultivos agrícolas, se consideraron los límites indicados en columnas “Concentración de referencia” referenciados a su respectiva procedencia de la Tabla 2-11.

Tabla 2-11: Parámetros químicos y concentraciones de referencia de calidad de suelo.

Parámetro	Unidad	Límite de detección	Concentración de referencia[1]	
			Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	<15[2]	>50[3]
Boro[4]	mg/kg	0,1	<0,75	>3.0
Cloruro	mg/kg	10	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	<2	>4
pH 25°C Laboratorio	u.a.	0,1	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	-	-
T° de medición pH	°C	0	-	-

Fuente: Elaboración propia

La mayoría de puntos considerados se ubican en el área en que se encuentra las fuentes de Boro y su entorno inmediato, incluyendo aquellos suelos ubicados en los principales afluentes en el área. Aguas abajo se ubican puntos representativos que permitieron evaluar la condición del cauce en el trayecto y previo a su descarga en el río Lluta.

Por otra parte, dado la sensibilidad de las áreas en que se realizará la intervención, se consideró que la construcción de calicatas se debió realizar de forma manual, por la imposibilidad de acceder con la maquinaria de excavación hasta los puntos de intervención, sin generar algún grado de impacto negativo a los ecosistemas existentes, y particularmente en las áreas de bofedales.

2.3.5 Caracterización Litológica

La caracterización de los puntos identificados en terreno se realizará mediante calicatas de 1 m de ancho por 1 m de largo y una profundidad estimada de 1,20 m, sin embargo, esta última podrá ser menor en aquellos casos en que el nivel freático o un estrato firmemente cementado no permitan el avance vertical de la excavación.

[1] Valores de Conductividad, pH, Sodio y Sulfato adaptados de “Rango de Interpretación” para informes de resultados de análisis de suelos, Laboratorio Agrícola y Foliar: Agrolab.

[2] Adaptado de: NORMA CHILENA OFICIAL. NCh2880.Of2004. Compost - Clasificación y requisitos.

[3] Adaptado de Acevedo, E. et. Al. 2005. Criterios de Calidad de Suelos y Aguas de Riego, Cap. 4. Metales Pesados en los Cultivos. División de Protección de los Recursos Naturales Renovables del SAG.

[4] Quezada C., Sandoval, M. y Zagal, E. 2008. Manejo de suelos en zonas áridas. Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Nº 3. Universidad de Concepción. pp. 119.

En los puntos seleccionados se realizó la descripción de los horizontes que componen el perfil, considerando: color (Munsell), espesor, clase textural, porosidad, consistencia, resistencia, rasgos redoximórficos, discontinuidades litológicas, etc.

La descripción en terreno, procesamiento, y presentación de la información se realizó siguiendo los criterios establecidos en el “Soil Survey Manual” (1993). Dicha forma de estudio es compatible y validada en Chile por organismos como el Servicio Agrícola y Ganadero, como también obedece a las metodologías de reconocimiento de suelos empleadas por el Centro de Información de Recursos Naturales CIREN.

2.3.6 Caracterización Química

En los suelos que conforman riberas y llanuras del río Colpitas, principalmente desde la zona de borateras y aguas abajo de éstas, existen extensos afloramientos salinos y, probablemente, estos suelos poseen además un alto contenido de Boro. Dado el origen de estos suelos se previó una importante interacción entre éstos y las aguas subsuperficiales, fundamentalmente debido al lavado de elementos acumulados lo que se produce por las características estacionales y pluviometría de la zona. Para conocer los elementos químicos de interés presentes en la fracción sólida del medio se requiere la caracterización química de los suelos del área, fundamentalmente entre 0 y 50 cm de profundidad.

Esta caracterización química se realizó en las calicatas y consideró determinar la concentración de los siguientes elementos:

- Contenido de Boro
- Contenido Arsénico
- Contenido Sodio
- Cloruros
- Sulfatos
- pH
- Conductividad Eléctrica
- Porcentaje de Sodio Intercambiable

La caracterización química de los suelos permitirá determinar la importancia de éstos en el aporte de elementos a través de aguas que infiltran y escurren lateralmente hacia los cursos que forman parte del río Colpitas.

2.4 Hidrología

En la Figura 2-11 presenta la disponibilidad temporal de la información de pluviometría o escurrimiento. La información proporcionada por la DGA correspondió al registro de caudales medios mensuales para un periodo de 33 años comprendidos entre los años 1980 y 2012, aunque estas estaciones presentan un mayor periodo de mediciones.

Figura 2-11: Disponibilidad de datos de pluviometría.

	AÑO																															
ESTACIÓN	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Caracarani en Humapalca	11	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5
Lluta en Alcerreca	1	3	11	11	10	8	12	11	12	12	12	10	9	10	12	12	12	12	12	10	10	3	0	0	9	2	12	8	12	12	12	9	5
Colpitas en Alcerreca	0	0	2	12	7	11	12	12	12	12	11	11	7	7	11	12	12	11	11	11	10	6	11	12	12	11	12	12	11	12	12	10	3

: 0 - 3 meses con información
: 3 - 6 meses con información
: 6 - 9 meses con información
: 9 - 12 meses con información

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la figura anterior, se observa que es necesario efectuar el relleno y extensión de las estadísticas disponibles para la estación río Colpitas en Alcérreca con el objetivo de generar una serie hidrológica de caudales medios mensuales con años completos (12 meses con registros) a partir de la cual se pueda realizar el análisis de frecuencia.

En la Tabla 2-12 se presenta el detalle del registro fluviométrico de la estación río Colpitas en Alcérreca suministrado por la DGA, en el cual se han considerado como datos eliminados los registros de caudales medios mensuales con menos de 11 días de información en el mes, de acuerdo con los criterios adoptados para análisis estadísticos de estaciones fluviométricas. En las Tabla 2-13 y Tabla 2-14 se presentan los registros de las estaciones fluviométricas de la DGA usadas en el presente estudio.

Tabla 2-12: Registro DGA de caudales medios mensuales (m^3/s) estación Colpitas en Alcérreca.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980												
1981												
1982											0.43	0.48
1983	0.42	0.47	0.43	0.53	0.50	0.48	0.42	0.40	0.36	0.36	0.35	0.45
1984	0.54	1.13	1.22	0.72	0.56	0.51				0.54	0.59	0.51
1985	0.58	1.61	1.16	1.54	0.52	0.49	0.47	0.44	0.39	0.37	0.53	0.66
1986	1.42	1.05	1.54	0.73	0.35	0.41	0.42	0.37	0.28	0.24	0.25	0.44
1987	1.69	1.17	0.51	0.51	0.55	0.59	0.69	0.61	0.57	0.50	0.51	0.49
1988	0.68	0.41	0.47	0.41	0.41	0.42	0.45	0.43	0.37	0.39	0.40	0.46
1989	0.57	0.61	0.35	0.45	0.44	0.44	0.49	0.49	0.45	0.46	0.47	0.48
1990	0.60	0.44	0.50	0.53	0.60	0.67	0.61	0.55	0.53	0.53	0.36	0.52
1991	1.22	0.64	0.74	0.35	0.37	0.45	0.44	0.44	0.32	0.33	0.35	0.31
1992		0.31	0.32	0.34			0.37	0.37	0.35	0.32	0.34	0.32
1993		0.40	0.78	0.43	0.41	0.43	0.43		0.35	0.34	0.33	0.38
1994	0.36	2.02	0.49	0.43	0.36	0.41	0.42	0.45	0.33	0.31	0.34	0.38
1995	0.36	0.30	0.46	0.36	0.37	0.35	0.35	0.34	0.32	0.32	0.31	0.32
1996	0.35	0.44	0.39	0.33	0.35	0.39	0.41	0.37	0.33	0.31	0.30	0.37
1997	0.88	2.73	2.03	0.61	0.53		0.37	0.39	0.35	0.31	0.31	0.30
1998	0.51	0.32	0.29	0.30	0.35	0.42	0.43	0.34	0.31	0.39	0.28	0.30
1999	0.30	0.98	1.56	0.45	0.42	0.46	0.46	0.44	0.34	0.32	0.32	0.31
2000	0.85	1.67	1.87	0.42	0.37	0.41	0.43	0.41	0.36	0.27	0.29	0.31
2001	0.96	1.67						0.53	0.48	0.46	0.45	0.50
2002	0.41	1.10	5.22	0.60	0.51	0.51	0.43	0.38	0.37	0.36	0.38	0.39
2003	0.42	0.40	0.56	0.41	0.45	0.45	0.52	0.45	0.42	0.40	0.39	0.40
2004	0.70	1.40	0.51	0.53	0.44	0.53	0.59	0.55	0.46	0.47	0.42	0.44
2005	0.51	0.77	0.52	0.43	0.46	0.54	0.54	0.50	0.49	0.44	0.46	0.49
2006	0.68	1.11	1.08	0.66	0.48	0.50	0.50	0.48	0.46	0.45	0.48	0.49
2007	0.77	0.47	0.67	0.43	0.42	0.45	0.44	0.45	0.42	0.39	0.38	0.41
2008	0.61	0.38	0.46	0.35	0.37	0.38	0.37	0.40	0.46	0.45		0.41
2009	0.41	0.55	0.65	0.56	0.51	0.47	0.44	0.42	0.56	0.53	0.53	0.42
2010	0.37	0.46	0.41	0.43	0.49	0.45	0.46	0.42	0.39	0.41	0.39	0.43
2011	0.58	1.48	0.65	0.49	0.43	0.39	0.43	0.41	0.42	0.42	0.39	0.52
2012	0.82		0.96	0.59	0.53							

: mes sin información
: mes con menos de 11 días de información (se elimina dato)

Fuente: Elaboración propia.

Adicional a la información anterior, se usaron las estadísticas rellenadas y extendidas de la estación Río Colpitas en Alcérreca realizadas en estudios previos (CADE-IDEPE, 2004; Prisma, 1992). Del estudio CADE-IDEPE (2004) se obtuvo una estadística de 33 años comprendida entre los años 1968 y 2000, mientras que a partir del estudio de Prisma (1992) se obtuvo una estadística de 30 años comprendida entre los años 1961 y 1990, en tanto que del estudio de. En la Tabla 2-13 y la Tabla 2-14 se presentan las estadísticas consideradas en el estudio de Prisma (1992) y CADE-IDEPE (2004) respectivamente.

Tabla 2-13: Estadística de caudales medios mensuales (m^3/s) (1960-1990).

Año	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT-MAR	ABR-SEP	ANUAL
60/61	.254 E	.766 E	.633 C	.923 E	.521 E	.839 E	.555 E	.351 E	.211 E	.251 E	.311 E	.225 E	.656	.317	.487
61/62	.130 E	.469 E	.696	.638	.971	.569	.583	.496	.497	.484	.449	.459	.579	.495	.537
62/63	.447	.483	.562	1.22	.377	.766	.747	.782	.335	.302	.501	.535	.642	.534	.588
63/64	.475	.475	.473	.416	.486	.607	.314	.641	.548	.428	.535 C	.380 C	.489	.474	.482
64/65	.174	.410	.597	.618	.752	.520	.475	.441	.194	.196	.440	.465	.512	.368	.440
65/66	.379	.331	.369	.356	.354	.414	.377	.351	.378	.430	.337	.119	.367	.391	.379
66/67	.432	.495	.601	.547	.066	.692	.561	.623	.570	.557	.504	.471	.472	.548	.510
67/68	.254	.728	.313	.273	.484	1.18	.414	.336	.321	.309	.433	.248	.540	.343	.442
68/69	.480	.501	.472	.513	.850	.921	.511	.518	.519	.498	.455	.394	.624	.482	.553
69/70	.390	.394	.440	.448	.419	.489	.459	.493	.511	.533	.502	.150	.431	.490	.460
70/71	.446	.426	.408	1.30	1.94	.437	.281	.288	.292	.303	.285	.287	.826	.289	.558
71/72	.281	.285	.323	1.06	.742	.940	1.02	.287	.282	.271	.264	.253	.605	.396	.501
72/73	.218	.235	.226	.402	.362	.313	.406	.257	.252	.255	.415	.269	.493	.309	.401
73/74	.265	.281	.274	.713	.714	.707	.490	.374	.410	.402	.490	.357	.492	.405	.448
74/75	.484	.401	.357	.458	.879	1.01	.744	.436	.412	.267	.217	.309	.598	.398	.498
75/76	.390	.476	.410	1.11	.726	1.31	.392	.400	.379	.365	.362	.369	.736	.378	.557
76/77	.507	.510	.462	.387	.793	2.29	.810	.449	.412	.450	.450	.432	.826	.502	.664
77/78	.403	.389	.423	.603	.433	.364	.364	.374	.388	.403	.335	.371	.437	.383	.410
78/79	.360	.338	.354	.591	.396	.691	.442	.463	.475	.463	.619	.428	.456	.482	.469
79/80	.427	.433	.495	.149	.443	.475	.436	.493	.483	.467	.430	.441	.404	.458	.431
80/81	.466	.499	.526	.577	.962	.471	.433	.369	.329	.304	.349	.302	.583	.361	.472
81/82	.351	.339	.343	.459	.472	.450	.433	.462	.502	.478	.384	.391	.403	.442	.423
82/83	.381	.389	.546	.661	.702	.649	.648	.618	.594	.529	.507	.455	.555	.558	.557
83/84	.455	.450	.555	.646	1.41	1.22	.744	.536	.541	.488	.653	.292	.794	.552	.673
84/85	.579	.627	.549	.617	1.62	1.17	1.54	.562	.532	.516	.481	.439	.860	.678	.769
85/86	.415	.568	.691	1.42	1.06	1.54	.754	.401	.453	.465	.417	.325	.941	.469	.709
86/87	.289	.299	.478	1.69	1.18	.553	.552	.507	.627	.715	.642	.604	.748	.621	.685
87/88	.544	.548	.535	.707	.455	.511	.458	.451	.463	.434	.470	.419	.550	.459	.505
88/89	.438	.442	.468	.147	.606	.346	.453	.440	.440	.489	.488	.452	.408	.460	.434
89/90	.461	.472	.483	.596	.437	.504	.532	.539	.668	.613	.551	.530	.492	.502	.537
V. MEDIO	.387	.449	.469	.675	.741	.785	.561	.465	.434	.424	.447	.395	.584	.454	.519
D. ST.	.109	.121	.117	.369	.406	.421	.249	.122	.121	.120	.103	.091	.155	.094	.098
C. VAR.	.283	.270	.250	.546	.547	.537	.445	.262	.279	.284	.230	.230	.264	.207	.189
C. ASIM.	-.637	.741	-.006	1.13	1.24	1.06	2.30	.505	.190	.047	-.096	-.003	.741	.320	.949
V. MAX.	.579	.766	.696	1.69	1.94	2.29	1.54	.782	.668	.715	.653	.604	.943	.678	.769
V. MIN.	.130	.235	.226	.147	.066	.346	.281	.257	.194	.196	.217	.225	.367	.289	.379

xxxx : Valor Observado xxxx E : Valor Extendido xxxx C : Valor Corregido xxxx : Valor Rellenado

Fuente: Prisma (1992).

Tabla 2-14: Estadística de caudales medios mensuales (m^3/s) (1968-2000).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1968	0.68 *	0.77 *	0.74 *	0.48 *	0.41 *	0.38 *	0.51 *	0.43 *	0.38 *	0.54 *	0.50	0.47
1969	0.51	0.85	0.52 *	0.51	0.52	0.52	0.50	0.46	0.39	0.39	0.39	0.44
1970	0.45	0.42	0.49	0.45	0.49	0.51	0.53	0.50	0.45	0.45	0.43	0.41
1971	1.32	1.53 *	0.44	0.28	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.28	0.29	0.32
1972	1.06	0.74	0.94	0.53 *	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.22	0.24	0.23
1973	0.81 *	1.16 *	0.73 *	0.46 *	0.26	0.25	0.26	0.60 *	0.47 *	0.39	0.28	0.27
1974	0.71	0.71	0.71	0.40 *	0.38	0.59	0.59	0.85	0.35	0.30	0.40	0.36
1975	0.46	0.88	1.58	0.42 *	0.62 *	0.58 *	1.09 *	1.21 *	0.36 *	0.41 *	0.35 *	0.61 *
1976	1.12 *	2.21 *	1.33 *	0.32 *	0.44 *	0.47 *	0.56 *	0.33 *	0.40 *	0.47 *	0.30 *	0.34 *
1977	0.48 *	0.61 *	0.82 *	0.64 *	0.48 *	0.49 *	0.47 *	0.58 *	0.45 *	0.59 *	0.35 *	0.38 *
1978	0.54 *	1.04 *	0.57 *	0.42 *	0.44 *	0.40 *	0.63 *	0.57 *	0.45 *	0.37 *	0.39 *	0.38 *
1979	0.48 *	0.54 *	0.80 *	0.36 *	0.35 *	0.28 *	0.26 *	0.30 *	0.32 *	0.29 *	0.34 *	0.37 *
1980	0.45 *	0.30 *	1.97 *	0.38 *	0.31 *	0.28 *	0.32 *	0.27 *	0.30 *	0.47 *	0.32 *	0.38 *
1981	0.77 *	3.21 *	1.59 *	0.61 *	0.41 *	0.28 *	0.25 *	0.36 *	0.33 *	0.54 *	0.35 *	0.97 *
1982	0.64 *	0.87 *	0.80 *	0.53 *	0.36 *	0.31 *	0.42 *	0.47 *	0.40 *	0.37 *	0.43	0.48
1983	0.42	0.47	0.43	0.32	0.50	0.48	0.42	0.40	0.36	0.36	0.35	0.45
1984	0.54	1.13	1.22	0.72	0.42 *	0.40 *	0.52 *	0.50 *	0.36 *	0.54	0.55	0.51
1985	0.58	1.61	1.16	0.74 *	0.52	0.49	3.12	0.89	0.39	0.37	0.53	0.66
1986	0.69	1.05	1.54	0.73	0.35	0.41	0.66	0.54	0.41	0.41	0.25	0.44
1987	0.59	1.17	0.51	0.51	0.35	0.35	0.69	0.61	0.35	0.37	0.37	0.33
1988	0.68	0.41	0.47	0.41	0.41	0.42	0.45	0.43	0.37	0.30	0.40	0.46
1989	0.57	0.61	0.35	0.45	0.44	0.44	0.49	0.49	0.45	0.46	0.47	0.48
1990	0.60	0.44	0.50	0.53	0.38	0.67	0.61	0.55	0.32	0.34 *	0.36	0.52
1991	0.54	0.64	0.74	0.35	0.37	0.45	0.59	0.50 *	0.32	0.33	0.35	0.31
1992	0.45 *	0.50 *	0.32	0.34 *	0.38 *	0.44 *	0.37	0.37	0.35	0.32	0.34	0.32
1993	0.64 *	0.63 *	0.78	0.43	0.41	0.43	0.43	0.63 *	0.35 *	0.47	0.44 *	0.38
1994	0.36	2.02	0.53 *	0.43	0.36	0.41	0.42	0.45	0.30	0.31	0.34	0.38
1995	0.36	0.30	0.46	0.36	0.37	0.35	0.35	0.34	0.32	0.32	0.31	0.32
1996	0.35	0.44	0.39	0.33	0.35	0.39	0.41	0.37	0.33	0.31	0.40	0.37
1997	0.88	1.58	1.13	0.61	0.53	0.31 *	0.37	0.53	0.40	0.31	0.31	0.30
1998	0.51	0.32	0.29	0.30	0.35	0.42	0.43	0.39 *	0.31	0.39	0.28	0.30
1999	0.30	1.79	1.56	1.24 *	0.42	0.46	0.46	0.44	0.34	0.32	0.32	0.31
2000	0.85	1.67	1.87	0.42	0.37	0.41	0.43	0.41	0.28	0.34 *	0.27 *	0.31
n	**33**	**33**	**33**	**33**	**33**	**33**	**33**	**33**	**33**	**33**	**33**	**33**
prom	**0.62**	**0.99**	**0.86**	**0.48**	**0.40**	**0.41**	**0.55**	**0.49**	**0.36**	**0.38**	**0.36**	**0.41**

Fuente: elaboración propia en base a estadística DGA

Nota: * Dato rellenado

Fuente: CADE-IDEPE (2004).

2.4.1 Relleno de Datos Faltantes

A partir de los registros de caudales medios mensuales y una vez eliminados los registros mensuales con menos de 11 días de información, se procedió a efectuar las correlaciones entre estaciones para rellenar la información de caudal de los meses faltantes. Correlaciones que se efectuaron con series de datos de un mismo mes entre dos estaciones. Los registros fluviométrico completos se encuentran en el Anexo A, Sección 10.1.1.

2.4.2 Análisis de Frecuencia

Para efectuar el análisis de frecuencia de los caudales medios mensuales en la estación Río Colpitas en Alcérreca a partir de la estadística rellenada, se aplicaron distintos modelos estadísticos, conocidos como *distribuciones de probabilidad*, de modo de escoger el que presente un mejor ajuste a los datos registrados. Una vez seleccionada la distribución, es posible extrapolar valores de caudal para distintas probabilidades de excedencia. El procesamiento de los datos a nivel medio mensual establecerá la mejor distribución de probabilidad por mes.

En términos generales, el procedimiento consiste en asignar una probabilidad de excedencia a cada uno de los registros, para calcular los parámetros correspondientes a cada distribución. Cabe señalar que la probabilidad asignada a cada registro corresponde a la expresión de Weibull, según la relación siguiente:

$$P=\frac{m}{n+1}x100$$

Donde:

P: Probabilidad de excedencia
m: Número de orden asignado a cada registro
n: Total de datos de la estadística

El procedimiento involucró ordenar los registros de mayor a menor, designando un número de orden para cada valor. A continuación se procede con el análisis de frecuencia, asignando las distintas distribuciones de probabilidad. Las distribuciones de probabilidad consideradas para el presente análisis fueron Normal, Log Normal, Gamma, Pearson III, Log Pearson III y Gumbel, usualmente utilizadas en los análisis estadísticos de datos hidrológicos.

Una vez realizado el análisis de frecuencia se aplicó el Test Chi-Cuadrado, con el fin de verificar la bondad el ajuste de las distribuciones para un nivel de significancia del 5%, estableciendo de este modo la selección de la mejor distribución de probabilidad para cada mes. El detalle con el análisis de frecuencia efectuado por mes de los

caudales medios mensuales en la estación río Colpitas en Alcérreca se presenta en el Anexo A, Sección 10.1.2.

2.4.3 Cálculo de Aforos

El caudal Q, se define como el volumen de agua ∀, que pasa por una sección en un determinado tiempo t, es decir:

$$Q = \frac{\forall}{t}$$

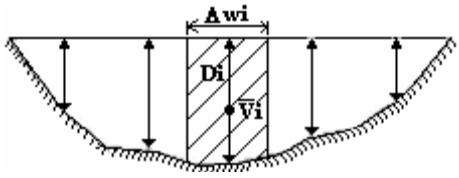
Aforar es medir un caudal. Existen métodos directos e indirectos. En este caso se utilizó el método indirecto de Área – Velocidad (Dussaubat & Vargas, 2005).

En este método se utiliza la ecuación de continuidad.

El caudal en una sección transversal de área A está dado por:

$$Q = \iint_A V \cdot dA$$

En donde la integral se aproxima sumando los caudales incrementales calculados para cada medición i, i = 1, 2,…, n, de velocidad $\bar{V}_i$ y profundidad D_i. Las mediciones representan valores promedio a lo largo de un ancho Δw_i del cauce, luego el caudal se calcula como:



$$Q = \sum_{i=1}^{n} \bar{V}_i \cdot D_i \cdot \Delta w_i$$

Por su parte, la velocidad V_i, en un punto, se puede medir, por ejemplo, con alguno de los siguientes dispositivos: flotador y reloj, molinetes y sensores de inducción magnética. En este caso se utilizó molinete.

Según sea el grado de precisión que se quiera obtener en el aforo, se tomarán mayor o menor número de puntos de medida en la sección. Cuando se pretende obtener una alta precisión, se elegirán mayor número de verticales en la sección y se calculará la velocidad media en cada vertical. Para cada sección entre dos verticales de medida, el área se calcula como el producto del promedio del alto por el ancho, y la velocidad media como el promedio de las velocidades medias en las verticales. El caudal de cada sección resulta directamente como el producto del área y la velocidad media, mientras que el caudal total se calcula como la suma de los caudales entre verticales.

La velocidad media del agua en cada vertical puede determinarse mediante los siguientes métodos, dependiendo del tiempo disponible y teniendo en consideración el ancho, la profundidad del agua, las condiciones del lecho, los cambios de nivel, así como la precisión con que se desea operar.

Se deben realizar distintas observaciones de velocidad en cada vertical dependiendo de la profundidad del curso del agua. Para secciones de poca profundidad (menores a 60 cm) se realizan observaciones en cada vertical colocando el molinete a 0,6 de la profundidad total por debajo de la superficie libre. Para profundidades superiores, generalmente, se mide la velocidad a 0,2 y luego a 0,8 de la profundidad de la superficie libre y se usa el promedio de las dos medidas como la velocidad media en la vertical.

2.5 Calidad Agroclimática

2.5.1 Variables Agroclimáticas

La caracterización agroclimática de la región de Arica y Parinacota corresponde al boletín emitido por INIA a través de UNEA (Unidad Nacional de Emergencias Agrícolas y Gestión del Riesgo Agroclimático) correspondiente al mes de noviembre 2013.

El INIA posee tres estaciones meteorológicas en el Valle del río Lluta:

- Valle Lluta bajo,
- Valle Lluta medio – Puro Chile
- Valle Lluta alto.

Para la caracterización agroclimática se tomaron valores de la estación Valle Lluta medio – Puro Chile, entre los meses noviembre 2009 hasta noviembre 2013, para las siguientes variables agrometeorológicas, como muestra la Tabla 2-15:

- Humedad relativa (%)

- Precipitación acumulada (mm)
- Radiación solar (MJ/m^2)
- Temperatura del aire máxima absoluta (°C)
- Temperatura del aire mínima absoluta (°C)
- Presión (mbar)
- Velocidad del viento (km/h)

Tabla 2-15: Variables agroclimáticas.

Variable/Fecha	Humedad Relativa (%)	Precipitación acumulada (mm)	Presión (mbar)	Radiación solar (MJ/m^2)	Velocidad del viento (km/h)	Temperatura del aire máxima (°C)	Temperatura del aire mínima (°C)
nov-2009	68,80	0,00	1.015,10	25,60	8,30	28,30	11,90
dic-2009	65,60	0,10	1.016,50	26,40	5,40	28,40	10,80
ene-2010	61,50	0,00	1.015,60	26,00	6,80	30,20	12,70
feb-2010	75,30	2.037,20	908,20	22,30	10,40	83,90	16,10
mar-2010	64,70	0,10	953,90	23,30	6,50	29,10	12,60
abr-2010	70,80	0,50	954,90	19,10	6,50	30,90	10,40
may-2010	73,80	0,00	955,70	15,60	5,80	29,20	7,50
jun-2010	77,70	0,00	957,30	14,20	5,40	22,50	6,20
jul-2010	76,10	0,00	958,00	16,10	5,80	20,50	2,10
ago-2010	76,10	0,10	956,80	18,40	6,10	30,70	4,00
sep-2010	76,20	0,00	956,70	20,70	6,80	27,30	4,90
oct-2010	70,70	0,00	956,70	24,90	7,60	24,20	7,50
nov-2010	68,60	0,00	955,80	28,10	7,90	26,40	7,70
dic-2010	64,80	0,00	954,80	27,50	7,60	28,00	9,30
Anual 2010	71,36	169,83	957,03	21,35	6,93	31,91	8,42
ene-2011	60,30	0,80	953,50	25,30	6,80	29,70	11,20
feb-2011	60,10	0,20	954,00	22,80	6,50	30,60	14,40
mar-2011	61,20	0,00	954,60	23,70	6,50	28,90	11,40
abr-2011	68,30	0,20	955,10	19,70	6,10	28,40	10,30
may-2011	74,10	0,00	955,20	16,70	6,10	25,30	7,10
jun-2011	78,00	5,80	956,00	14,10	5,80	23,70	8,50
jul-2011	79,70	1,00	956,20	13,00	5,40	23,20	7,80
ago-2011	77,50	1,50	956,30	16,80	6,10	22,30	6,60
sep-2011	74,80	7,10	956,50	20,90	7,20	24,00	5,90
oct-2011	68,60	2,10	956,20	24,40	7,60	26,60	6,00
nov-2011	67,70	1,90	955,20	26,40	7,90	26,40	9,00
dic-2011	65,20	15,50	954,50	24,20	7,20	28,50	11,10
Anual 2011	69,63	3,01	955,28	20,67	6,60	26,47	9,11

Fuente: Agromet, 2013

Tabla 2-15: Variables agroclimáticas. (Continuación)

Variable/Fecha	Humedad Relativa (%)	Precipitación acumulada (mm)	Presión (mbar)	Radiación solar (MJ/m^{2}d)	Velocidad del viento (km/h)	Temperatura del aire máxima (°C)	Temperatura del aire mínima (°C)
ene-2012	58,80	2,70	954,50	23,20	6,80	30,40	12,50
feb-2012	59,90	0,40	953,40	21,30	6,10	31,30	12,80
mar-2012	64,90	0,00	952,80	21,00	6,50	30,60	13,40
abr-2012	65,10	0,00	954,70	18,80	6,10	29,90	9,60
may-2012	72,60	0,00	954,90	18,30	5,80	27,60	7,00
jun-2012	75,40	1,20	955,80	15,90	5,00	25,40	8,00
jul-2012	75,40	0,20	955,70	15,80	5,40	22,80	7,10
ago-2012	76,30	0,90	956,70	17,40	6,10	23,30	7,50
sep-2012	74,70	1,20	956,10	20,10	6,80	24,80	8,50
oct-2012	70,60	329,60	955,70	23,70	7,90	26,90	9,60
nov-2012	68,60	1,10	955,20	21,20	7,60	26,80	8,80
dic-2012	64,50	0,00	954,10	17,40	7,60	28,80	11,00
Anual 2012	68,90	28,11	954,97	19,51	6,48	27,38	9,65
ene-2013	63,90	0,50	953,90	15,60	7,20	29,50	11,10
feb-2013	59,30	0,00	953,40	11,70	6,50	31,90	14,20
mar-2013	66,10	0,00	954,10	9,40	6,50	31,20	11,30
abr-2013	67,60	0,00	955,20	8,30	5,80	27,40	8,50
may-2013	73,00	0,00	956,50	6,00	5,40	26,80	5,90
jun-2013	75,50	0,30	955,90	5,30	5,00	24,30	4,80
jul-2013	77,90	0,00	956,10	5,70	5,00	26,10	5,00
ago-2013	76,20	0,30	956,30	6,70	5,80	22,40	5,50
sep-2013	73,60	0,00	955,80	8,60	6,80	25,30	8,50
oct-2013	70,70	0,00	955,60	9,70	7,60	25,10	9,10
nov-2013	67,40	0,30	955,00	10,50	7,20	27,50	7,60

Fuente: Agromet, 2013

2.5.2 Balance Hídrico

Una cuenca hidrográfica puede ser definida como "el área topográfica de la zona en la que el escurrimiento de agua superficial aparente drena a un punto específico de un arroyo o de un cuerpo de agua, como un lago", de esta forma una cuenca funciona como un colector de agua convirtiendo las entradas de agua en escorrentía y almacenando agua. Conociendo las características de una cuenca (precipitación, escurrimiento, evapotranspiración e infiltración de las aguas subterráneas), permitirá evaluar la temporada y la disponibilidad espacial del agua, esto es útil para la asignación y control de flujo del agua.

El balance hídrico es una herramienta que permite conocer características de la cuenca mediante la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad, de acuerdo con este principio, cualquier diferencia entre las entradas y salidas deben reflejarse en un cambio en el almacenamiento de agua dentro del área del presupuesto.

2.5.2.1. Cálculo de Evapotranspiración

La evapotranspiración es un componente fundamental del balance hidrológico y un factor clave en la interacción de la superficie terrestre y la atmósfera. Su cuantificación se hace necesaria en contextos tan diferentes como la producción vegetal, la planificación y la gestión de recursos o estudios ambientales y ecológicos; depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta, por esta razón se introdujo el término evapotranspiración de referencia.

Existen variados métodos para estimar directa o indirectamente la evapotranspiración de referencia. Los métodos directos se basan en la entrada y salida de agua en un cultivo específico, donde se obtiene la evapotranspiración real o similar, entre ellos se mencionan los lisímetros, microlisímetros, balance de energía de Bowen y sistema de flujos turbulentos. Por otro lado, entre los métodos indirectos se denota a Penman Monteith FAO 56 que se utiliza para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos, cuando se dispone de sistemas de registros automatizados, además posee una precisión adecuada para diferentes zonas del mundo (Jensen et al., 1990). El objetivo del trabajo fue seleccionar un método indirecto alternativo al método de Penman Monteith FAO 56 para estimar en forma diaria la evapotranspiración de referencia en el Valle del Lluta (Torres & Vásquez, 2013).

Para estimar la evapotranspiración de referencia en el Valle del Lluta, se utilizaron métodos descritos en la Tabla 2-16. De acuerdo a Torres y Vásquez (2013), estudio realizado en el Valle de Chaca (Arica) calcularon la evapotranspiración referencia con el método Hargreaves Samani 1985. Obteniendo un mejor ajuste para esta zona con solamente dos variables como la temperatura y la radiación solar.

Tabla 2-16: Métodos utilizados para estimar la evapotranspiración de referencia

Método	Fórmula	Coeficientes
Blaney y Criddle FAO 24	$Et_0=a+b\times f$	$a=0,0043\times(Rhmin)\times\left(\frac{n}{N}\right)-1,41$ $b=0,82\times0,0041\times(Rhmin)+1,07\times\left(\frac{n}{N}\right)\times0,006+u_2-0,006$ $\times Rhmin\times\left(\frac{n}{N}\right)-0,0006\times(Rhmin)\times u_2$ $f=p\times(0,46\times T+8,13)$
Radiación FAO 24	$Et_0=a+b\times\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)\times(R_s\|)$	$a=-0,3$ $-0,315\times10^{-4}\times Rhm^2-0,11\times10^{-2}\times(u_2)^2$ $b=1,066-0,13\times10^{-2}\times Rhm+0,045\times u_2-0,2\times10^{-3}Rhm\times u_2$
Penman 1948	$Et_0=\frac{\Delta\times(R_n-G)+\gamma\times6,43\times f((u)\times(ea-ed))}{\Delta+\gamma}$	$f(u)=0,27\times\left(\frac{1+u_2}{100}\right)$
Hargreaves-Samani 1985	$Et_0=0,0023\times R_a\times(T+17,89)\times TD^{0,5}$	$TD=(T°_{max}-T°_{min})(°C)$
Bandeja de Evaporación	$Et_0=E_{pan}\times K_p$	$K_p=0,61+0,00341\times Rhm-9,59\times10^{-7}\times u_2\times BORDE+0,00327\times u_2\times\ln(BORDE)-0,0028$ $\times u_2\times\ln(86,4\times u_2)\times\ln(BORDE)+0,00063\times(\ln(BORDE))^2\times\ln(86,4\times u_2)$
Penman Monteith FAO 56	$Et_0=\frac{0,408\times\Delta\times(R_n-G)+\gamma\times\frac{900}{T+273}\times u_2\times(es-ea)}{\Delta+\gamma\times(1+0,34\times u_2)}$	-

Fuente: Torres & Vásquez, 2013

2.5.2.2. Cálculo de Evaporación

La evaporación es un proceso físico por el cual determinadas moléculas de agua aumentan su nivel de agitación por aumento de temperatura, y si están próximas a la superficie libre, escapan a la atmósfera. Inversamente otras moléculas de agua existentes en la atmósfera, al perder energía y estar próximas a la superficie libre pueden penetrar en la masa de agua.

En hidrología, la evaporación es una de las variables hidrológicas importantes al momento de establecer el balance hídrico de una cuenca hidrográfica o parte de esta.

Los factores que determinan la evaporación en superficies libres:

- Poder evaporante de la atmosfera.
- Temperatura del agua.
- Tamaño de la masa de agua. El volumen de la masa de agua y su profundidad son factores que afectan a la evaporación por el efecto de calentamiento de la masa. Si es con poca profundidad sufren un calentamiento mayor que facilita la evaporación.
- Salinidad. Disminuye la evaporación, fenómeno que sólo es apreciable en el mar (inversamente).

Las formulas semiempíricas para el cálculo de evaporación desde superficies de agua libre, relacionan algunos factores que influyen en el fenómeno y engloban los demás en coeficientes empíricos, constantes para cada lugar, que deben ajustarse según las medidas experimentales obtenidas:

Un grupo de formulas se basan en la ley de Dalton, siendo la más utilizada y empleada la Formula de Fitzgerald (1886):

$$E = (0,4 + 0,449\ V)(e_s - e_d)$$

Donde:

V: velocidad del viento (km/h)

e_s: tensión de vapor saturante para temperatura superficial del agua

e_d: tensión de vapor en el aire

2.6 Geofísica

El estudio geofísico tuvo como objetivo investigar el subsuelo del sector, ampliando el nivel de conocimiento del acuífero con el fin de determinar la geometría del acuífero somero.

Las líneas geofísicas trazadas tenían como finalidad la caracterización general de los sistemas geológicos e hidrogeológicos; conocer el espesor de los acuíferos no confinados; y conocer la profundidad del lecho rocoso. El conocimiento de los espesores de los acuíferos es de ayuda en la caracterización hidrogeológica para calcular los caudales del flujo de agua subterránea.

El método geofísico utilizado fue la resistividad de tomografía eléctrica (RTE) para investigar las características geológicas e hidrogeológicas del subsuelo a través de la reconstrucción de perfiles de resistividad del subsuelo

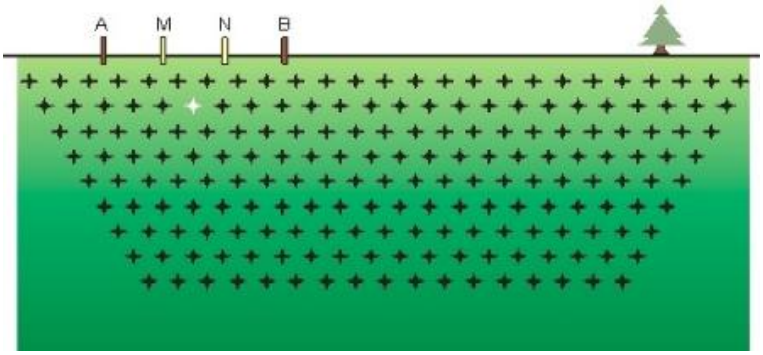
Los trabajos fueron realizados aplicando la técnica de resistividad de tomografía eléctrica (RTE), utilizando instalaciones de electrodos de acero inoxidable distanciados cada diez metros, a lo largo de cada perfil. Estos electrodos fueron conectados mediante un cable multi-conductor a un instrumento de medición de resistividad de suelos de extrema sensibilidad, con capacidad de transmisión de corriente continua de hasta 2.500 miliamperios (mA) y 1.200 voltios (V). Cada perfil fue construido con una densidad de mediciones de 1.200 mediciones por km (Descloitres et al, 2008, Chambers et al., 2006, Bentley & Gharibi, 2004, Koch, 2004).

La tomografía eléctrica consiste en la introducción en el terreno de una corriente continua, mediante dos electrodos denominados A y B (electrodos de corriente), conectados a una fuente de energía de intensidad conocida (mA). Mediante otros dos electrodos M y N (electrodos de potencial) se mide la diferencia de potencial (mV). Con estas dos medidas (intensidad y diferencia de potencial) se obtiene la resistividad aparente del material afectado por la corriente eléctrica en varios puntos del subsuelo (Figura 2-12).

Además, de forma adicional, con el mismo dispositivo se pueden registrar datos de cargabilidad del terreno mediante el registro del decaimiento del potencial inyectado para obtener un modelo de Polarización Inducida.

Para optimizar la adquisición de los datos se colocan un gran número de electrodos en la superficie del terreno. En cada punto de medida se seleccionan cuatro electrodos que forman las diferentes combinaciones AB-MN. De este modo se obtiene un pseudo-perfil con resistividades aparentes del terreno.

Figura 2-12: Dispositivo de medición mediante una configuración eléctrica (punto blanco: punto de medida; puntos negros: desplazamiento y distancia entre electrodos)



El procesado de datos se realiza a través de un algoritmo tomográfico que reconstruye la distribución de las resistividades del subsuelo. Para eso, hay dos conceptos importantes a mencionar. Primero, aplica una “ley” geofísica llamada regla de aliasing que indica que básicamente la cantidad de celdas de la malla de elementos finitos resultante no puede tener más celdas que la cantidad de datos de entrada, es decir, puntos de resistividad medidos con diferentes configuraciones. Resulta que sí se obtienen más datos, más celdas puede tener la malla resultante y por lo tanto más detallados son los resultados. Esto es válido dentro del marco de la geofísica de los campos potenciales.

Segundo, similar al primer argumento, cada medición agrega un valor llamado sensibilidad al subsuelo, ya que el campo eléctrico ingresado no existe solamente entre los cuatro electrodos seleccionados, sino por todo el subsuelo. Por lo tanto, la sensibilidad es mayor a cero en muchas partes del subsuelo de una medición.

Generalmente, cerca de la superficie la sensibilidad es muy alta, es decir los valores de resistividad resultantes del proceso tomográfico tienen mucha certeza en cuanto magnitud y forma geométrica en superficie, pero esta sensibilidad baja considerablemente en profundidad. Al obtener más puntos de medición, cada una de las sensibilidades agrega algo a la sensibilidad total del registro, por lo tanto funciona de forma acumulativa. Mientras que la sensibilidad cerca de superficie rápidamente alcanza valores adecuados para un buen proceso, al agregar más mediciones se benefician también sectores en profundidad ya que en profundidad las sensibilidades son bajas, pero acumulan igual que en todas partes. Por tanto, agregar más mediciones al registro tomado desde superficie genera una mejor imagen en profundidad.

Por otra parte, a partir de la información de la reconstrucción tomográfica, combinado con el uso de información adicional, permite generar mapas de humedad en función de profundidad desde superficie. Para esto se requiere de información adicional obtenida por ensayos en laboratorio. En estos ensayos se realiza la obtención de curvas

características de humedad versus resistividad, en función de otras variables como densidad y porosidad del material y conductividad eléctrica de los fluidos en el terreno.

Como resultado, se pueden transformar las secciones de resistividad a secciones de humedad en volumen, y humedad en peso. Éste último, considerando la historia deposicional de las zonas a estudiar para estimar las densidades.

Debido a la densidad de datos adquiridos, es posible generar gradientes verticales y horizontales de resistividad lo que permite identificar el comportamiento hidráulico del acuífero.

2.7 Topografía

De acuerdo con lo requerido por el estudio, entre los días 6 al 10 de enero de 2014, se realizó el levantamiento topográfico en el sector Colpitas. El objetivo específico de esta actividad fue el de levantar la información topográfica del área de estudio para caracterizar secciones representativas de cauces superficiales, en la parte alta de la cuenca, en el área donde eventualmente, y sólo previo a la ejecución de estudio técnicos, ambientales y económicos que resultasen favorables, podría considerarse la instalación y construcción de soluciones de ingeniería para el tratamiento y/o conducción de las aguas.

El equipo utilizado para la medición es una Estación total electrónica Leyca TCr805, cuyo Certificado de Calibración se presenta en el Anexo B, Sección 10.2.1.

Respecto de la medición, ésta se realizó utilizando el Datum WGS84, Huso 19. El levantamiento se realizó con coordenadas UTM. La distancia entre curvas se definió entre 5 y 10 m. Considerando que la distancia entre el río y el área a levantar era cercana a los 5,5 km se definió la separación entre los perfiles transversales en 40 m.

2.8 Percepción Remota

La metodología empleada en el estudio se basó en las técnicas tradicionales de análisis morfométrico aplicados a estudios de hidrología, e implementados a través de Sistemas de Información Geográfico, particularmente de los sistemas GRASS y QGIS. Asimismo parte del procesamiento estadístico se hizo a través del lenguaje R.

Por su parte el procesamiento de la imagen Landsat 8 se hizo a través de los sistemas de procesamiento de imágenes OPTICKS, Monteverdi y TNT_MIPS. En el procesamiento de imágenes se aplicaron técnicas de filtrado, realce de contraste, Análisis de Componentes Principales y clasificación no supervisada.

2.8.1 Bases de datos

Para el desarrollo de este estudio se consideraron dos bases de datos principales, una corresponde al Modelo Digital de Terreno AsterDEM V2 para la delimitación y análisis de las características morfométricas de la Cuenca de Colpitas y sus subcuencas. La otra fuente de datos son imágenes Landsat 8 para analizar las características del sustrato por donde escurren las cuencas dentro de la cuenca.

2.8.2 Modelo Digital de Terreno

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) corresponde a una grilla con representación numérica del relieve, donde cada pixel contiene un valor de altura. Para el caso del sector de la Cuenca del río Colpitas se trabajó con un MDT obtenido a partir de imágenes satelitales ASTER, que tiene una resolución de 30 m, esto significa que para cada pixel de 30 x 30 m existe un valor de altura. Esta resolución es al menos igual o superior en detalle respecto de lo que se puede tener a partir de las curvas de nivel 1:50.000 de las cartas del IGM. Los modelos fueron generados por el METI (Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón) y NASA (National Aeronautics and Space Agency). Se trabajó con la versión 2. El detalle y las características de este modelo se pueden consultar en el informe “ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results” (2011).

2.8.3 Landsat 8

Landsat 8 es el más reciente satélite para la observación de la tierra puesto en órbita en febrero del año 2013 por la NASA y es la continuación de un proyecto iniciado el año 1972.

Los sensores montados sobre Landsat 8 son el OLI (Operational Land Imager) y el TIRS (Thermal Infrared Sensor). Este satélite orbita sobre la tierra a una altura de 705 km, con una capacidad de revisita de un mismo lugar de cada 16 días. Las principales características de esta plataforma son las que se especifican a continuación:

Tabla 2-17: Características imágenes Landsat 8.

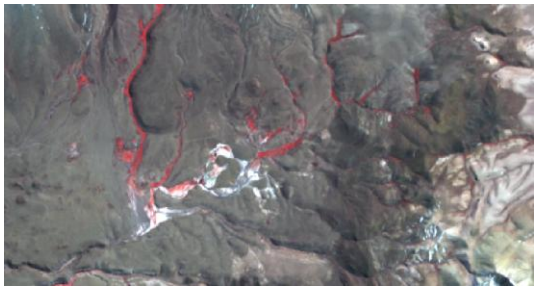
Banda	Resolución Espacial (m)	Rango Espectral (µm)	Denominación
1	30	0,43 – 0,45	Costera/aerosoles
2	30	0,45 – 0,51	Azul
3	30	0,53 – 0,59	Verde
4	30	0,64 – 0,67	Rojo
5	30	0,85 – 0,88	NIR (Infrarrojo cercano)
6	30	1,57 – 1,65	SWIR (Infrarrojo de onda corta)
7	30	2,11 – 2,29	SWIR (Infrarrojo de onda corta)
8	15	0,5 – 0,68	Pancromática
9	30	1,36 – 1,38	Cirrus
10	100	10,60 – 11,19	TIR (infrarrojo termal)
11	100	11,50 – 12,51	TIR (infrarrojo termal)

Para este estudio se ha trabajado con una imagen captada el 26 de abril del 2013, obtenida a través del USGS (Servicio Geológico de EEUU).

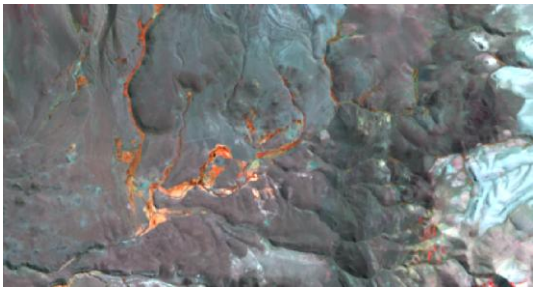
A través del uso de las características multiespectrales de las imágenes se pueden poner de relieve distintos aspectos del territorio, muchos de los cuales, no son perceptibles a simple vista por el observador. A modo de ejemplo se ilustran algunas combinaciones de banda del satélite Landsat 8. Por ejemplo, en la Figura 2-13b resalta en rojo la vegetación, la cual no se logra identificar bien en la Figura 2-13a. Por otra parte en la Figura 2-13c destacan aspectos de la litología en la parte central norte en color verdoso que no son perceptibles en las otras combinaciones de bandas.

Figura 2-13: a, b, c, y d. Distintas combinaciones de bandas de imagen satelital Landsat 8 que resaltan distintos aspectos y componentes del territorio en el sector de borateras en la Cuenca del río Colpitas.

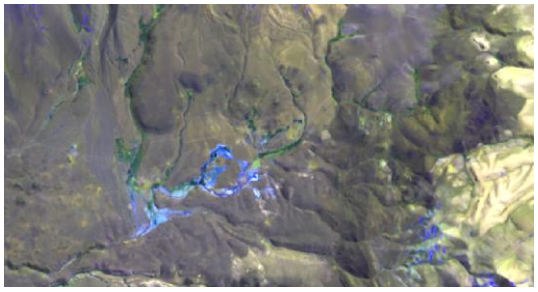
Combinación 432 (color natural)



Combinación 543



Combinación 457



Combinación 752

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

3.0 ACTIVIDADES DE TERRENO Y PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO

3.1 Campañas de Terreno

Según lo establecido en las Bases de Licitación del estudio y en Oferta Técnica Presentada, el desarrollo del estudio requirió de la programación y ejecución de seis campañas de levantamiento de información en terreno, en las que debía considerarse lo siguiente:

- 6 campañas de monitoreo de calidad de agua.
- 4 campañas hidrológicas.
- 10 calicatas y análisis físico y químico de sedimentos.
- Perfiles geofísicos.
- Topografía en secciones definidas.
- 2 talleres de difusión: provincias Arica y Parinacota.

3.1.1 Visita inicial de Reconocimiento del Sitio

Para el desarrollo del estudio se propuso una ubicación preliminar de puntos de monitoreo de calidad del agua y suelo, los cuales fueron definidos en gabinete a partir de información secundaria, referencias bibliográficas y cartografía digital.

La factibilidad de acceso y representatividad de los fenómenos químicos y territoriales de los puntos de monitoreo preliminares fueron verificadas en terreno en la visita de reconocimiento de sitio, realizada entre los días 20 y 21 de febrero, 2013. Esta campaña de terreno consistió en realizar un recorrido desde la parte alta de la cuenca hasta la desembocadura del río Colpitas en el río Lluta. Como resultado se definió la ubicación de los puntos de muestreo a considerar en el estudio, éstos se georreferenciaron y se realizó una inspección visual en las zonas alta y baja de la cuenca en estudio.

3.1.2 Programación de las Campañas de Terreno

A partir de la visita inicial de reconocimiento del sitio, y conocida la condición de accesibilidad al área de estudio, se definió la programación de las campañas de terreno, la cual sufrió algunas variaciones debidas a la gestión de obtención de permisos de acceso, a la disponibilidad de las empresas consultoras y a la condicionante climática.

Finalmente, la ejecución de las campañas de terreno programadas se realizó según se presenta en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Programación de campañas de terreno y actividades realizadas.

	Actividad programada/realizada						
	Muestreo hidroquímico	**Muestreo isótopos**	**Aforo**	**Muestreo sedimentos**	**Muestreo suelos**	**Geofísica**	**Topografía**
Campaña 1	✓	✓	✓				
Campaña 2	✓		✓	✓			
Campaña 3	✓		✓		✓		
Campaña 4	✓	✓	✓				
Campaña 5	✓					✓	
Campaña 6	✓						✓

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el programa de trabajo definido para el estudio, la Tabla 3-1 presenta las campañas de terreno realizadas y las actividades principales ejecutadas en cada una de ellas.

3.1.3 Síntesis de las Campañas de Terreno

A continuación se presenta una ficha resumen de la información general relativa a cada una de las campañas, así como un registro fotográfico de las actividades realizadas (Ver Tabla 3-2 a Tabla 3-8 y Figura 3-1 a Figura 3-6).

Tabla 3-2: Ficha resumen visita inicial de reconocimiento de sitio.

Aspecto	Descripción
Fecha:	18 al 22 de febrero, 2013
Participantes:	AMEC.
Objetivo:	Reconocer el sitio. Verificar factibilidad de acceso a los puntos de muestreo predefinidos. Validación de representatividad química y espacial de puntos de muestreo. Identificación de otros potenciales puntos de monitoreo.
Cumplimiento/ Modificaciones del programa:	Las actividades definidas fueron realizadas según lo planificado.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-3: Ficha resumen Campaña de Terreno N°1.

Aspecto	Descripción
Fecha:	18 al 21 de marzo, 2013
Participantes:	AMEC, SGS.
Objetivo:	Medición de parámetros in situ y toma de muestras de agua. Medición de aforo.
Cumplimiento/ Modificaciones del programa:	Las actividades definidas fueron realizadas según lo planificado. Se midieron parámetros in situ y se tomaron muestras de agua en los puntos PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, y PM6. Se midió aforo de los caudales en los puntos PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, y PM6.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4: Ficha resumen Campaña de Terreno N°2.

Aspecto	Descripción
Fecha:	27 al 31 de mayo, 2013
Participantes:	AMEC, SGS
Objetivo:	Medición de parámetros in situ y toma de muestras de agua. Medición de aforo. Toma de muestras de sedimentos. Incorporación de representantes de la comunidad Colpitas a los trabajos de terreno.
Cumplimiento/ Modificaciones del programa:	El punto PM4 no fue muestreado debido a que el cauce no presentaba escurrimiento superficial. Se midieron parámetros in situ y se tomaron muestras de agua en los puntos PM1, PM2, PM3, PM5 (con duplicado), PM6 (con duplicado), Termal, AP1, AP2, AP3, AP4, AP5, y AP6. Se midió aforo de los caudales en los puntos PM1, PM2, PM3, PM5, y PM6. Se tomaron muestras de sedimentos en los puntos PM1, PM2, PM3, y PM5. El resto de las actividades definidas fueron realizadas según lo planificado.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-5: Ficha resumen Campaña de Terreno N°3.

Aspecto	Descripción
Fecha:	3 al 6 de septiembre, 2013
Participantes:	AMEC, SGS, ALVA.
Objetivo:	Medición de parámetros in situ y toma de muestras de agua. Medición de aforo. Realización de calicatas y toma de muestras de calicatas. Incorporación de representantes de la comunidad Colpitas a los trabajos de terreno.
Cumplimiento/ Modificaciones del programa:	El Punto PM-4 no fue muestreado debido a que el cauce no presentaba escurrimiento superficial. Se midieron parámetros in situ y se tomaron muestras de agua en los puntos PM1, PM2, PM3, PM5, PM6, PM9, Termal, AP1, AP2, AP3, AP4, AP5, y AP6. Se midió aforo de los caudales en los puntos PM1, PM2, PM3, PM5, y PM6. Se realizaron 11 calicatas y se muestreó suelo a diferentes profundidades. El resto de las actividades definidas fueron realizadas según lo planificado.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-6: Ficha resumen Campaña de Terreno N°4.

Aspecto	Descripción
Fecha:	16 al 18 de octubre, 2013
Participantes:	AMEC, SGS.
Objetivo:	Medición de parámetros in situ y toma de muestras de agua. Medición de aforo. Incorporación de representantes de la comunidad Colpitas a los trabajos de terreno.
Cumplimiento/ Modificaciones del programa:	El Punto PM-4 no fue muestreado debido a que el cauce no presentaba escurrimiento superficial. Se midieron parámetros in situ y se tomaron muestras de agua en los puntos PM1, PM2, PM3, PM5, PM6, PM9, Termal, y AP1. Se midió aforo de los caudales en los puntos PM1, PM2, PM3, PM5, y PM6. El resto de las actividades definidas fueron realizadas según lo planificado.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-7: Ficha resumen Campaña de Terreno N°5.

Aspecto	Descripción
Fecha:	19 al 22 de noviembre, 2013
Participantes:	AMEC, SGS.
Objetivo:	Medición de parámetros in situ y toma de muestras de agua. Caracterización geofísica. Incorporación de representantes de la comunidad Colpitas a los trabajos de terreno.
Cumplimiento/ Modificaciones del programa:	Los puntos PM-3 y PM-4 no fueron muestreado debido a que el cauce no presentaba escurrimiento superficial. No fue posible tomar muestra en el punto Termal. Se midieron parámetros in situ y se tomaron muestras de agua en los puntos PM1, PM2, PM5, PM6, PM9, y AP3. El resto de las actividades definidas fueron realizadas según lo planificado.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-8: Ficha resumen Campaña de Terreno N°6.

Aspecto	Descripción
Fecha:	7 al 10 de enero, 2014
Participantes:	AMEC, SGS, ALVA.
Objetivo:	Medición de parámetros in situ y toma de muestras de agua. Medición de parámetros in situ y toma de muestras de agua lluvia. Caracterización de topografía. Incorporación de representantes de la comunidad Colpitas a los trabajos de terreno.
Cumplimiento/ Modificaciones del programa:	No fue posible tomar muestra en el punto Termal. Se midieron parámetros in situ y se tomaron muestras de agua en los puntos PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6, y PM9. Se midieron parámetros in situ y se tomaron muestras de agua en los puntos ALl1 y ALl2. Las actividades definidas fueron realizadas según lo planificado.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N° 1.

Figura 3-2: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°2.

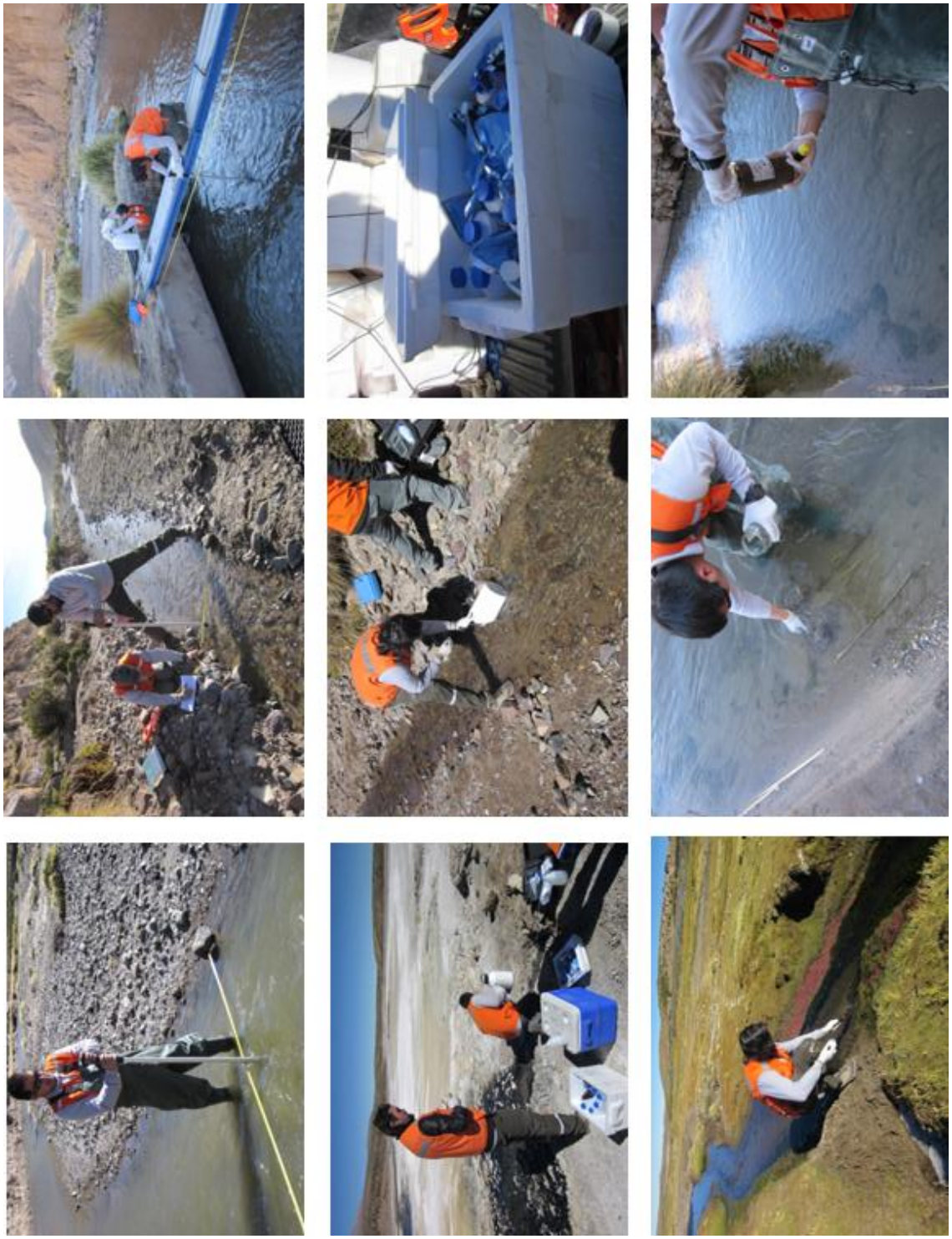


Figura 3-3: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°3.

Figura 3-4: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°4.

Figura 3-5: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°5.

Figura 3-6: Registro fotográfico de la Campaña de Terreno N°6.

3.1.4 Incorporación de la Comunidad Colpitas a los Trabajos de Terreno

En el entendido que la incorporación de la comunidad al desarrollo de los estudios corresponde a la manera óptima de ejecutar un trabajo, en tanto la comunidad se hace partícipe de las actividades del estudio y pone a disposición su conocimiento del territorio, su experiencia respecto de la ocurrencia de los fenómenos naturales y su apoyo logístico. En este sentido, y en particular en un área aislada como es el caso de la Cuenca del río Colpitas, la comunidad se convierte en un actor clave para el desarrollo exitoso de un estudio.

Como parte de los acuerdos establecidos con la comunidad Colpitas, a partir de la Campaña de Terreno N°2 se incorporó al desarrollo de las actividades a representantes de la comunidad, en calidad de guías territoriales. El valioso aporte entregado por la comunidad facilitó la ejecución de las campañas de terreno, así como también permitió dejar constancia que los trabajos realizados en terreno no implicaron alteración del medio natural ni humano presente en el área estudio.

Figura 3-7: Representantes de la comunidad en la Campaña de Terreno N°2.

3.1.5 Empresas Colaboradoras

Para el desarrollo de las actividades de terreno se consideró la necesidad de incorporar al equipo de trabajo empresas especializadas en ciertas tareas. A continuación se presentan las empresas que colaboraron en el desarrollo del estudio.

- SGS, Chile Ltda, Rut: 80.914.400-3, empresa encargada del muestreo y análisis de agua y sedimentos.

- AguaEx SpA, Rut: 76.110.192-7, empresa encargada de desarrollar el estudio geofísico.

- ALVA Ltda, Rut: 76.059.097-5, empresa encargada de ejecutar los trabajos de calicatas y mediciones topográficas.

La incorporación de estas empresas al estudio se realizó previa presentación de antecedentes y posterior aprobación por parte de la Inspección Fiscal. La participación de estas empresas se realizó bajo la modalidad de subcontrato. Todos los trabajos realizados por las empresas colaboradoras fueron supervisados por profesionales de AMEC.

3.2 Presentaciones del Estudio a la Comunidad

3.2.1 Presentación Inicial del Estudio en Arica

A requerimiento de la Inspección Fiscal, el día 11 de abril, 2013 se realizó la presentación oficial del estudio ante representantes de la autoridad regional y comunal, y representantes del cuerpo técnico de la SEREMI MOP XV Región. Así mismo, se contó con la participación del Director Nacional de la DGA-MOP, y representantes de las organizaciones ciudadanas, tales como Comunidad Indígena Colpitas, Junta de Vigilancia del río Lluta, representantes Valle de Azapa, académicos de la Universidad de Tarapacá, entre otros.

3.2.2 Presentación Inicial a la Comunidad Colpitas

Como parte de los acuerdos establecidos con la comunidad Colpitas, el día 11 de junio, 2013 se realizó una presentación del estudio a los miembros de la comunidad Colpitas, en la Sede Vecinal de dicha localidad.

La finalidad del taller se centró en presentar a AMEC como empresa encargada por DGA-MOP de la ejecución de un estudio con base geográfica en la Cuenca del río Colpitas. Asimismo se explicó a la comunidad que se realizarían 6 campañas de terreno, dentro de un plazo estimado de 12 meses.

Al taller asistieron un total de 10 representantes de la comunidad, profesionales de AMEC y el Inspector Fiscal del Contrato, en representación de la DGA.

Figura 3-8: Presentación del estudio a la comunidad.

Figura 3-9: Registro asistencia presentación comunidad Colpitas.

LISTA DE ASISTENCIA REUNIÓN INFORMATIVA

COLPITAS

11 de Junio 2013

Nombre	Organización	Firma
MARCELO HUANCA		
EUSEBIO HUAYLLA PACO		
DARIO HUANCA		
IRMA HUAYLLA PACO		
HUMBERTA HUAYLLA PACO		
FELIX PIMA HUAYLLA	Familia Huaylla-Paco	
DANIELA HUAYLLA		
NICOLAS HUAYLLA PACO		

LISTA DE ASISTENCIA REUNIÓN INFORMATIVA

COLPITAS

11 de Junio 2013

Nombre	Organización	Firma
ROSA FLORES		
EUSEBIO HUAYLLA PACO		

3.2.3 Actividad de Difusión de Resultados del Estudio

Una vez finalizado el estudio se desarrollaron los talleres de difusión programados para marzo de 2014.

El taller de Arica se realizó el día 26 de marzo, a las 10:00, y contó con la participación de autoridades regionales, representantes de servicios públicos, representantes de la comunidad Colpitas, población local, entre otros.

El taller de Putre se realizó el día 27 de marzo, a las 16:00, y contó con la participación representantes de servicios públicos, representantes de la comunidad Colpitas, población local, entre otros.

El contenido de las presentaciones consideró los siguientes temas:

- Marco territorial
- Objetivos, alcance y plan de trabajo
- Resultados
- Propuesta alternativas de solución
- Recomendaciones

En ambos talleres, la exposición de los resultados se centró en aspectos fundamentales del trabajo, entre ellos: percepción remota, calidad de agua y geofísica.

En el taller de Arica, se observó que el estudio aportaba datos relevantes para el mejor manejo de las aguas de la subcuenca del Colpitas, y que existían propuestas de solución de su uso que cubren distintas opciones tanto aguas arriba como en la zona agrícola del valle.

En el taller de Putre, considerando las preguntas realizadas por la representante de la comunidad Colpitas, se presentaron resultados sobre la calidad de agua en los puntos utilizados como toma de agua de consumo humano, indicando que si bien eran de buena calidad no cumplían la norma de agua potable.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

4.0 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DEL PROYECTO

4.1 Calidad de Agua

4.1.1 Resultados de la Caracterización de la Calidad del Agua

4.1.1.1. Agua para Riego

Los resultados de las mediciones de parámetros in situ y de los análisis de laboratorio de las muestras de agua (PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM6, PM9, y Termal) de las Campañas de Terreno, se muestra en tablas para el agua superficial y agua lluvia, por campaña en las Tabla 4-1 a Tabla 4-6. Las tablas se ordenan mostrando el nombre de la muestra de acuerdo al punto de monitoreo muestreado, la fecha y hora de toma de muestra, y los resultados de las mediciones de parámetros in situ y análisis de laboratorio. En la última columna se muestra como referencia los valores máximos permitidos por la sección 6, Requisitos del agua para riego de la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978), y dentro de la tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma.

Se observa que el punto de monitoreo PM1, que se encuentra antes de las borateras, solo sobrepasa en dos de seis Campañas de Terreno el valor máximo permisible de Boro. Ningún otro valor se encuentra fuera de rango, y sus aguas se clasifican como “Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales” según su salinidad.

El punto de monitoreo Termal, y que se encuentra en una misma terma en el sector de las borateras, presenta valores por sobre lo permisible para agua de riego según la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978) de Arsénico, Boro, cloruro, Litio, Sodio porcentual, y sulfato en todas las Campañas de Terreno en que fue muestreado. También muestra valores por sobre lo permisible de Cobre, fluoruro, y Manganeso en al menos una de las tres Campañas de Terreno en que fue muestreado. Además, las aguas de este punto están clasificadas como “Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos” y está por fuera del rango superior de la clasificación del agua según su salinidad.

El punto de monitoreo PM2, que se encuentra inmediatamente aguas abajo del sector de las borateras, presenta valores por sobre lo permisible para agua de riego según la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978) de Arsénico, Boro, cloruro, Litio, Manganeso, Sodio porcentual, y sulfato en todas las Campañas de Terreno en que fue muestreado. También muestra valores por sobre lo permisible de Cobre en una de un total de seis Campañas de Terreno. Además, las aguas de este punto están clasificadas como “Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos”.

El punto de monitoreo PM3, que es un afluente del río Colpitas, presenta valores por sobre lo permisible para agua de riego según la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978) de Arsénico, Boro, y Sodio porcentual en todas las Campañas de Terreno en que fue muestreado. También muestra valores por sobre lo permisible de cloruro, Hierro, y Manganeso en al menos una de un total de cinco Campañas de Terreno. Además, las aguas de este punto están clasificadas como “Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles”, por su salinidad.

El punto de monitoreo PM4, que es un afluente del río Colpitas, presenta valores por fuera de lo permisible para agua de riego según la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978) de pH, Aluminio, y Manganeso solo para una de las dos Campañas de Terreno en las cuales fue posible muestrear. Además, las aguas están clasificadas como “Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales”, por su salinidad. El punto de monitoreo PM9, que es un afluente del río Colpitas, presenta valores por fuera de lo permisible para agua de riego según la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978) de Boro y Sodio porcentual en al menos dos de las cuatro Campañas de Terreno en las cuales fue muestreado. Además, las aguas están clasificadas como “Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales”, por su salinidad.

El punto de monitoreo PM5, que es la estación de Colpitas antes de la confluencia con Caracarani, presenta valores por sobre lo permisible para agua de riego según la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978) de Arsénico, Boro, cloruro, Manganeso, y Sodio porcentual en todas las Campañas de Terreno en que fue muestreado. También muestra valores por sobre lo permisible de Aluminio, Hierro, y sulfato en al menos una de un total de seis Campañas de Terreno. Además, las aguas están clasificadas como “Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos”, por su salinidad.

El punto de monitoreo PM6, que es la estación de Caracarani antes de la confluencia con Colpitas, presenta valores por sobre lo permisible para agua de riego según la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978) de Aluminio y Boro en todas las Campañas de Terreno en que fue muestreado. También muestra valores fuera de lo permisible de pH, Arsénico, cloruro, Hierro, Manganeso, Sodio porcentual, y sulfato en al menos una de las seis Campañas de Terreno. Además, las aguas están clasificadas como “Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos”, por su salinidad.

Los resultados aquí mostrados son un resumen de los certificados de análisis, que no pueden ser editados ni manipulados de ninguna forma, y que para los alcances de este proyecto, la reproducción de los informes debe ser total y no parcial. Los certificados de los análisis de SGS se encuentran en el Anexo D, Sección 10.4.1.

Tabla 4-1: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°1 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 20/3/13 12:00	PM2 20/3/13 17:15	PM3 20/3/13 16:00	PM4 20/3/13 16:40	PM5 20/3/13 14:40	PM6 20/3/13 13:50	NCh 1333.Of78
pH en terreno	u.a.		8,24	4,76	8,17	8,54	7,96	3,75	5,5-9,0
Temperatura en terreno	°C		14,90	16,90	17,58	16,03	18,43	14,88	
Conductividad en terreno	µs/Cm		346	4080	506	395	2038	1624	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		3,91	3,50	3,03	2,56	3,29	4,18	
Turbiedad en terreno	NTU		1,36	17,70	4,06	8,44	16,60	58,30	
Potencial Redox en terreno	mV		-50,4	-34,5	-34,5	-41,2	-36,8	-16,4	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	81	192	140	0,6	119	<0,2	
Aluminio	mg/L	0,5	<0,5	<0,5	0,6	9,0	1,4	25	5,00
Amonio	mg/L	0,03	<0,03	0,03	<0,03	0,04	<0,03	<0,03	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,02650	1,0250	0,1460	0,00440	0,480	0,1280	0,10
Arsénico (III)	mg/L	0,002	0,005	0,804	0,018	0,001	0,386	0,012	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,022	0,148	0,105	0,002	0,057	0,114	
Bario	mg/L	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	4,00
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10
Bicarbonatos	mg/L	0,2	98	234	162	0,7	144	<0,2	
Boro	mg/L	0,01	0,30	48,7	2,97	0,11	18,2	3,83	0,75
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Calcio	mg/L	0,01	31,2	105	23,0	12,1	85,3	72,1	

Tabla 4-1: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°1 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 20/3/13 12:00	PM2 20/3/13 17:15	PM3 20/3/13 16:00	PM4 20/3/13 16:40	PM5 20/3/13 14:40	PM6 20/3/13 13:50	NCh 1333.Of78
Carbonatos	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	4,5	<0,2	<0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,20
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,06	1,25	2,00
Cloruro	mg/L	5,00	2,94	962	57,0	1,14	397	196	200,00
Cobalto	mg/L	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,050
Cobre	mg/L	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,02	0,02	0,02	0,20
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	23	540	5,0	<1,8	<1,8	<1,8	1.000
Conductividad a 25 °C	µS/Cm	1	346	4080	506	395	2038	1624	
Cromo	mg/L	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,10
Fluoruro	mg/L	0,5	0,11	0,30	0,11	0,11	0,31	0,48	1,00
Fosfato (como P)	mg/L	0,2	0,6	<0,2	0,8	0,2	0,8	0,7	
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	0,15	0,42	0,22	1,3	0,68	5,9	5,00
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	0,15	0,42	0,22	1,3	0,68	5,9	
Litio	mg/L	0,01	<0,01	3,3	0,06	<0,01	1,1	0,14	2,50
Magnesio	mg/L	0,01	9,8	16	6,3	2,2	22	34	

Tabla 4-1: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°1 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 20/3/13 12:00	PM2 20/3/13 17:15	PM3 20/3/13 16:00	PM4 20/3/13 16:40	PM5 20/3/13 14:40	PM6 20/3/13 13:50	NCh 1333.Of78
Manganeso	mg/L	0,01	0,03	0,22	0,02	0,12	0,46	1,3	0,20
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,010
Níquel	mg/L	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,20
Nitrato	mg/L	0,02	<0,02	1,3	0,02	<0,02	0,29	0,59	
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Plata	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,09	5,00
Potasio	mg/L	0,01	4,9	58	3,9	3,4	43	19	
Razón Absorción Sodio			0,80	17	3,4	0,60	4,8	2,3	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,020
Sodio	mg/L	0,01	20	686	72	8,8	193	95	
Sodio Porcentual	%		26	79	64	31	54	37	35,00
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	248	2428	300	173	1224	946	
Sulfato	mg/L	0,02	81	258	23	88	178	558	250,00
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Turbiedad	NTU	0,05	0,76	3,0	4,3	13	9,5	34	
Vanadio	mg/L	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,10

Tabla 4-2: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°2 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 30/5/13 9:50	PM2 30/5/13 8:40	PM3 30/5/13 13:30	PM5 30/5/13 17:20	PM6 30/5/13 16:15	PM7 30/5/13 17:50	PM8 30/5/13 16:50	Termal 30/5/13 11:00	NCh 1333.Of78
pH en terreno	u.a.		8,32	8,03	8,74	8,15	4,83	8,19	4,87	6,23	5,5-9,0
Temperatura en terreno	°C		10,78	0,46	7,77	12,04	9,01	11,96	8,99	43,41	
Conductividad en terreno	µs/Cm		314	4780	759	2193	1204	1942	1187	7991	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		6,77	8,30	7,30	5,93	9,18	5,98	8,20	2,03	
Turbiedad en terreno	NTU		4,47	10,20	22,30	4,41	22,70	7,39	23,80	2,18	
Potencial Redox en terreno	mV		-18,6	-8,4	-16,3	-35,8	-9,6	-34,8	-10,3	-16,4	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	47	203	178	123	1,8	124	1,6	784	
Aluminio	mg/L	0,05	<0,05	0,32	0,08	<0,05	9,9	<0,05	8,9	<0,05	5,00
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Amonio	mg/L	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,02270	1,110	0,1510	0,4680	0,06950	0,4750	0,07440	7,060	0,10
Arsénico (III)	mg/L	0,002	<0,002	0,014	0,003	0,007	<0,002	0,006	<0,002	0,106	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,022	1,10	0,148	0,461	0,069	0,469	0,074	6,95	
Bario	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,14	4,00
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10
Bicarbonatos	mg/L	0,2	58	247	198	150	2,3	151	1,9	956	
Boro	mg/L	0,01	0,27	65,8	6,21	23,1	4,52	25,9	3,56	306	0,75
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010

Tabla 4-2: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°2 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 30/5/13 9:50	PM2 30/5/13 8:40	PM3 30/5/13 13:30	PM5 30/5/13 17:20	PM6 30/5/13 16:15	PM7 30/5/13 17:50	PM8 30/5/13 16:50	Termal 30/5/13 11:00	NCh 1333.Of78
Calcio	mg/L	0,01	21,7	104	19,8	60,7	50,9	59,0	50,5	182	
Carbonatos	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	9,0	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,20
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,57	<0,01	0,48	<0,01	2,00
Cloruro	mg/L	5,00	8,00	1.298	131	502	176	506	180	7.083	200,00
Cobalto	mg/L	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,050
Cobre	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	8,0	17	2,0	2,0	<1,8	5,0	<1,8	<1,8	1.000
Conductividad a 25 °C	µs/Cm	1								19.440	
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10
Fluoruro	mg/L	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,50	<0,5	0,60	3,58	1,00
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	0,08	1,02	0,22	0,32	1,76	0,43	1,77	0,49	5,00
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	0,08	1,02	0,22	0,32	1,76	0,43	1,77	0,49	
Litio	mg/L	0,01	<0,01	4,32	0,09	1,55	0,17	1,41	0,15	17,9	2,50
Magnesio	mg/L	0,01	7,21	18,6	5,89	18,7	24,7	17,3	23,6	28,2	
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	0,31	<0,01	0,43	0,67	0,52	0,45	0,23	0,20

Tabla 4-2: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°2 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 30/5/13 9:50	PM2 30/5/13 8:40	PM3 30/5/13 13:30	PM5 30/5/13 17:20	PM6 30/5/13 16:15	PM7 30/5/13 17:50	PM8 30/5/13 16:50	Termal 30/5/13 11:00	NCh 1333.Of78
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Nitrato	mg/L	0,02	1,26	3,68	1,41	1,58	1,05	1,57	0,95	4,49	
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	0,04	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Plata	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,00
Potasio	mg/L	0,01	3,89	53,8	2,89	47,1	13,0	43,9	12,5	246	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,020
Sodio	mg/L	0,01	25,0	744	118	275	97,4	278	92,5	4750	
Sodio Porcentual	%		25	80	72	67	46	67	46	92	35,00
Sólidos Totales	mg/L	5								11.545	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	265	3.005	452	1.469	959	1.390	824	11.500	
Sulfato	mg/L	0,02	105	388	40,0	239	340	230	329	319	250,00
Sulfuro Total	mg/L	0,2								<0,2	
Turbiedad	NTU	0,05	0,51	6,93	2,65	3,48	18, 0	2,60	17,5	4,67	
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10

Tabla 4-3: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 04/9/13 10:50	PM2 04/9/13 11:45	PM3 04/9/13 12:05	PM5 04/9/13 9:40	PM6 04/9/13 9:20	PM9 06/9/13 14:05	Termal 06/9/13 9:40	NCh 1333.Of78
pH en terreno	u.a.		8,28	7,85	8,71	7,94	5,54	8,13	6,31	5,5-9,0
Temperatura en terreno	°C		14,74	13,64	17,67	10,57	2,91	11,32	44,50	
Conductividad en terreno	µS/cm		646	5641	1437	3321	1727	284	19600	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		3,45	3,29	3,33	4,20	9,10	3,17	1,26	
Turbiedad en terreno	NTU		6,57	143,00	13,10	0,19	22,20	3,48	1,20	
Potencial Redox en terreno	mV		157,3	180,4	222,6	270,1	271,2	98,1	-140,2	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	52,0	186	222	122	1,1	68,0	779	
Aluminio	mg/L	0,05	<0,05	0,95	<0,05	<0,05	12,9	<0,05	<0,05	5,00
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Amonio	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,02330	1,320	0,2060	0,4660	0,08120	0,0140	9,710	0,10
Arsénico (III)	mg/L	0,002	<0,002	0,021	0,008	0,011	<0,002	<0,002	3,174	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,023	1,299	0,198	0,455	0,080	0,012	6,536	
Bario	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	4,00

Tabla 4-3: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 04/9/13 10:50	PM2 04/9/13 11:45	PM3 04/9/13 12:05	PM5 04/9/13 9:40	PM6 04/9/13 9:20	PM9 06/9/13 14:05	Termal 06/9/13 9:40	NCh 1333.Of78
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10
Bicarbonatos	mg/L	0,2	63,0	227	226	149	1,3	83,0	950	
Boro	mg/L	0,01	1,90	68,3	9,00	20,4	3,52	1,03	295	0,75
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Calcio	mg/L	0,01	31,0	112	41,0	81,0	77,0	14,0	156	
Carbonatos	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	22,0	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,20
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,59	<0,01	<0,01	2,00
Cloruro	mg/L	5,00	7,00	1.318	202	597	192	24,0	6.556	200,00
Cobalto	mg/L	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,050
Cobre	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	17,0	70,0	<1,8	5,0	<1,8	<1,8	<1,8	1.000
Conductividad a 25 °C	µS/cm	1	337	5010	1101	2550	1325	233	20080	
Cromo	mg/L	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10

Tabla 4-3: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 04/9/13 10:50	PM2 04/9/13 11:45	PM3 04/9/13 12:05	PM5 04/9/13 9:40	PM6 04/9/13 9:20	PM9 06/9/13 14:05	Termal 06/9/13 9:40	NCh 1333.Of78
Fluoruro	mg/L	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,60	<0,5	<0,5	1,00
Fosfato (como P)	mg/L	0,15	0,3	0,3	0,2	0,6	<0,15	<0,15	2,2	
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	0,28	1,90	<0,01	0,37	2,74	0,21	0,35	5,00
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	0,28	1,90	<0,02	0,37	2,74	0,21	0,35	
Litio	mg/L	0,01	0,08	4,65	0,21	1,45	0,18	<0,01	21,5	2,50
Magnesio	mg/L	0,01	10,8	19,1	14,2	21,4	35,6	4,69	22,0	
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	0,26	<0,01	0,22	1,10	<0,01	0,10	0,20
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Nitrato	mg/L	0,02	1,42	3,69	1,15	1,77	0,89	3,23	2,53	
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	

Tabla 4-3: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333.Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 04/9/13 10:50	PM2 04/9/13 11:45	PM3 04/9/13 12:05	PM5 04/9/13 9:40	PM6 04/9/13 9:20	PM9 06/9/13 14:05	Termal 06/9/13 9:40	NCh 1333.Of78
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Plata	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,00
Potasio	mg/L	0,01	6,25	55,0	7,27	60,7	20,1	5,04	241	
Razón Absorción Sodio			0,90	15,0	6,20	9,80	2,80	1,10	60,0	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,020
Sodio	mg/L	0,01	23,0	670	180	379	119	22,0	3018	
Sodio Porcentual	%		28	77	70	69	42	40	89	35,00
Sólidos Totales	mg/L	5	286	3070	675	1624	1004	172	13060	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	266	3000	661	1606	966	162	11380	
Sulfato	mg/L	0,02	108	349	63,0	302	292	21,0	328	250,00
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Turbiedad	NTU	0,05	0,62	3,77	0,80	1,65	2,83	0,65	4,28	
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10

Tabla 4-4: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°4 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 17/10/13 14:45	PM2 17/10/13 14:40	PM3 17/10/13 12:30	PM5 17/10/13 10:45	PM6 17/10/13 10:10	PM9 17/10/13 11:50	Termal 17/10/13 16:10	NCh 1333.Of78
pH en terreno	u.a.		8,60	8,13	8,97	8,26	4,95	7,67	6,35	5,5-9,0
Temperatura en terreno	°C		16,62	19,50	18,76	14,50	6,54	12,10	51,30	
Conductividad en terreno	µS/cm		338	4466	1450	2565	1428	483	18070	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		1,76	1,59	1,58	2,30	2,54	2,53	2,23	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	36,0	192	272	124	0,6	104	815	
Aluminio	mg/L	0,05	<0,05	0,77	<0,05	0,21	8,91	<0,05	<0,05	5,00
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Amonio	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,02820	2,110	0,2730	0,4870	0,1170	0,03570	9,550	0,10
Arsénico (III)	mg/L	0,002	<0,002	0,028	0,004	0,008	0,003	<0,002	0,243	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,028	2,082	0,269	0,480	0,114	0,035	9,307	
Bario	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	0,12	4,00
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10
Bicarbonatos	mg/L	0,2	44,0	235	282	151	0,7	127	993	
Boro	mg/L	0,01	0,85	65,6	12,3	21,3	3,53	2,65	289	0,75

Tabla 4-4: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°4 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 17/10/13 14:45	PM2 17/10/13 14:40	PM3 17/10/13 12:30	PM5 17/10/13 10:45	PM6 17/10/13 10:10	PM9 17/10/13 11:50	Termal 17/10/13 16:10	NCh 1333.Of78
Boro Disuelto	mg/L	0,01	0,79	60,4	11,5	19,7	3,13	2,46	279	
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Calcio	mg/L	0,01	31,0	113	52,0	77,0	69,0	21,0	188	
Calcio Disuelto	mg/L	0,01	28,0	113	50,0	70,0	65,0	20,0	187	
Carbonatos	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	24,0	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,20
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,48	<0,01	<0,01	2,00
Cloruro	mg/L	5,00	8,00	1.344	306	577	191	62,0	6.473	200,00
Cobalto	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,050
Cobre	mg/L	0,01	0,20	0,57	<0,01	<0,01	<0,01	0,16	0,22	0,20
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	<1,8	540	<1,8	7,8	<1,8	<1,8	<1,8	1.000
Conductividad a 25 °C	µS/cm	1	346	5140	1559	2530	1288	410	19320	
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10
Fluoruro	mg/L	0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	1,00
Fosfato (como P)	mg/L	0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	

Tabla 4-4: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°4 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 17/10/13 14:45	PM2 17/10/13 14:40	PM3 17/10/13 12:30	PM5 17/10/13 10:45	PM6 17/10/13 10:10	PM9 17/10/13 11:50	Termal 17/10/13 16:10	NCh 1333.Of78
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	0,17	2,46	0,08	0,95	1,92	0,23	0,67	5,00
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	0,17	2,46	0,20	0,95	1,92	0,23	0,67	
Litio	mg/L	0,01	<0,01	4,37	0,21	1,67	0,19	0,11	19,8	2,50
Litio Disuelto	mg/L	0,01	<0,01	3,91	0,20	1,39	0,19	0,10	17,8	
Magnesio	mg/L	0,01	8,78	17,8	17,9	20,4	31,7	7,25	22,8	
Magnesio Disuelto	mg/L	0,01	8,77	15,1	15,1	18,5	26,9	6,74	22,0	
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	0,25	<0,01	0,30	0,68	<0,01	0,22	0,20
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Nitrato	mg/L	0,02	1,26	4,75	1,95	1,87	0,97	3,01	2,32	
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	0,10	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	

Tabla 4-4: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°4 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 17/10/13 14:45	PM2 17/10/13 14:40	PM3 17/10/13 12:30	PM5 17/10/13 10:45	PM6 17/10/13 10:10	PM9 17/10/13 11:50	Termal 17/10/13 16:10	NCh 1333.Of78
Plata	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,00
Potasio	mg/L	0,01	5,46	76,4	7,90	60,1	18,5	6,81	265	
Potasio Disuelto	mg/L	0,01	5,21	73,9	6,21	57,1	16,1	6,21	249	
Razón Absorción Sodio			0,8	19	7,7	9,2	2,9	2,2	68	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,020
Sodio	mg/L	0,01	18,8	810	250	349	116	46,4	3675	
Sodio Disuelto	mg/L	0,01	18,4	794	238	336	111	42,6	3497	
Sodio Porcentual	%		25	80	72	68	44	52	90	35,00
Sólidos Totales	mg/L	5	329	3060	909	1604	980	296	13105	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	321	2840	888	1584	972	281	12560	
Sulfato	mg/L	0,02	107	342	86,0	254	249	28,0	302	250,00
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Turbiedad	NTU	0,05	0,84	9,70	1,04	0,97	26,4	0,48	4,53	
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10

Tabla 4-5: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°5 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 21/11/13 12:05	PM2 21/11/13 13:25	PM5 21/11/13 17:35	PM6 21/11/13 13:50	PM9 21/11/13 14:35	NCh 1333.Of78
pH en terreno	u.a.		8,27	7,99	8,11	4,74	8,97	5,5-9,0
Temperatura en terreno	°C		16,31	18,61	19,99	15,27	11,60	
Conductividad en terreno	µS/cm		294	5981	2680	1220	652	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		53,40	47,40	47,70	52,90	41,60	
Turbiedad en terreno	NTU		5,84	26,80	2,05	22,20	10,50	
Potencial Redox en terreno	mV		31,7	7,6	9,3	83,4	21,8	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	33,0	205	123	<0,2	115	
Aluminio	mg/L	0,05	<0,05	0,90	0,52	10,2	<0,05	5,00
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Amonio	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,02810	2,240	0,5620	0,1090	0,0850	0,10
Arsénico (III)	mg/L	0,002	0,004	0,040	<0,002	0,003	0,002	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,305	2,200	0,013	0,106	0,083	
Bario	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	4,00
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10

Tabla 4-5: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°5 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 21/11/13 12:05	PM2 21/11/13 13:25	PM5 21/11/13 17:35	PM6 21/11/13 13:50	PM9 21/11/13 14:35	NCh 1333.Of78
Bicarbonatos	mg/L	0,2	38,0	250	151	<0,2	140	
Boro	mg/L	0,01	0,39	62,0	28,1	3,42	5,37	0,75
Boro Disuelto	mg/L	0,01	0,30	80,7	27,9	3,34	5,15	
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Calcio	mg/L	0,01	32,0	142	82,0	74,0	28,0	
Calcio Disuelto	mg/L	0,01	28,0	127	82,0	72,0	26,0	
Carbonatos	mg/L	0,2	0,9	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,20
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,50	<0,01	2,00
Cloruro	mg/L	5,00	8,00	1.599	615	201	126	200,00
Cobalto	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,050
Cobre	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	0,33	<0,01	<0,01	0,20
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	33,0	540	2,0	<1,8	<1,8	1.000
Conductividad a 25 °C	µS/cm	1	345	5350	2691	1285	735	
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10

Tabla 4-5: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°5 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 21/11/13 12:05	PM2 21/11/13 13:25	PM5 21/11/13 17:35	PM6 21/11/13 13:50	PM9 21/11/13 14:35	NCh 1333.Of78
Fluoruro	mg/L	0,50	<0,50	<0,50	<0,50	0,50	<0,50	1,00
Fosfato (como P)	mg/L	0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	<0,01	3,16	2,29	2,11	0,24	5,00
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	<0,02	3,16	2,29	2,11	0,24	
Litio	mg/L	0,01	<0,01	5,33	1,79	0,21	0,18	2,50
Litio Disuelto	mg/L	0,01	<0,01	4,80	1,77	0,22	0,17	
Magnesio	mg/L	0,01	9,90	21,5	23,2	35,3	10,7	
Magnesio Disuelto	mg/L	0,01	8,45	19,0	22,0	33,9	10,1	
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	0,32	0,29	0,73	<0,01	0,20
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,010
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Nitrato	mg/L	0,02	0,79	3,07	2,27	0,73	1,76	
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	0,12	<0,02	<0,02	<0,02	

Tabla 4-5: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°5 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 21/11/13 12:05	PM2 21/11/13 13:25	PM5 21/11/13 17:35	PM6 21/11/13 13:50	PM9 21/11/13 14:35	NCh 1333.Of78
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Plata	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,20
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,00
Potasio	mg/L	0,01	5,48	94,3	66,8	18,9	9,70	
Potasio Disuelto	mg/L	0,01	4,52	84,3	66,0	18,6	9,10	
Razón Absorción Sodio			0,9	17	9	3,1	3,6	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,020
Sodio	mg/L	0,01	21,5	836	357	127	88,6	
Sodio Disuelto	mg/L	0,01	18,1	760	352	124	80,6	
Sodio Porcentual	%		27	76	67	44	60	35,00
Sólidos Totales	mg/L	5	282	3300	1671	922	455	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	279	3260	1638	892	450	
Sulfato	mg/L	0,02	118	367	274	326	48,0	250,00
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0	<0	<0	<0	<0	
Turbiedad	NTU	0,05	0,36	5,22	0,95	9,30	0,25	
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10

Tabla 4-6: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°6 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 08/1/14 10:00	PM2 08/1/14 11:00	PM3 08/1/14 11:30	PM4 08/1/14 12:35	PM5 08/1/14 14:15	PM6 08/1/14 13:45	PM9 08/1/14 12:00	PALI1 09/1/14 9:30	PALI2 09/1/14 11:30	NCh 1333.Of78
pH en terreno	u.a.		8,18	8,09	8,76	4,29	8,23	4,50	8,42	8,59	7,79	5,5-9,0
Temperatura en terreno	°C		10,90	12,70	13,90	13,80	15,00	13,70	15,60	9,70	18,00	
Conductividad en terreno	µS/cm	1	337	4027	537	248	1786	1364	196	30	64	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		5,30	5,30	5,10	5,30	5,30	5,00	5,50	6,30	5,40	
Turbiedad en terreno	NTU		19,20	52,40	373,00	61,30	705,00	725,00	26,90	53,60	32,20	
Potencial Redox en terreno	mV		157,4	133,3	117,3	320,6	162,4	311,2	117,7	134,6	180,5	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	84,0	181	136	<0,2	111	<0,2	70,0	17,0	8,0	
Aluminio	mg/L	0,05	1,22	1,32	6,94	4,99	13,8	23,0	0,55	1,02		5,00
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03			
Amonio	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03			
Arsénico	mg/L	0,00042	0,02690	1,210	0,1180	0,01910	0,6530	0,160	0,00469	<0,01		0,10
Arsénico (III)	mg/L	0,002	<0,002	0,048	0,003	<0,002	0,179	0,004	<0,002			
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,025	1,162	0,115	<0,004	0,474	0,156	0,004			
Bario	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,18	0,23	<0,01	<0,01		4,00
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		0,10

Tabla 4-6: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°6 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 08/1/14 10:00	PM2 08/1/14 11:00	PM3 08/1/14 11:30	PM4 08/1/14 12:35	PM5 08/1/14 14:15	PM6 08/1/14 13:45	PM9 08/1/14 12:00	PALI1 09/1/14 9:30	PALI2 09/1/14 11:30	NCh 1333.Of78
Bicarbonatos	mg/L	0,2	103	220	166	<0,2	136	<0,2	85,0	20,0	9,8	
Boro	mg/L	0,01	0,64	53,0	4,55	0,26	21,6	3,57	0,47	<0,01		0,75
Boro Disuelto	mg/L	0,01	0,50	52,1	3,98	0,18	20,5	3,28	0,45	<0,01		
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		0,010
Calcio	mg/L	0,01	32,0	121	35,0	26,0	74,0	110	19,0	3,09	5,58	
Calcio Disuelto	mg/L	0,01	31,0	119	31,0	25,0	71,0	100	18,0	2,65	5,21	
Carbonatos	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02			0,20
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,82	<0,01	<0,01		2,00
Cloruro	mg/L	5,00	9,00	1.321	89,0	<5,00	540	185	11,0	2,19	5,76	200,00
Cobalto	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		0,050
Cobre	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,11		0,20
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	23,0	1.600	350	4,5	>1.600	23,0	33,0			1.000
Conductividad a 25 °C	µS/cm	1	345	4150	593	256	1874	1441	201			
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		0,10

Tabla 4-6: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°6 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 08/1/14 10:00	PM2 08/1/14 11:00	PM3 08/1/14 11:30	PM4 08/1/14 12:35	PM5 08/1/14 14:15	PM6 08/1/14 13:45	PM9 08/1/14 12:00	PALI1 09/1/14 9:30	PALI2 09/1/14 11:30	NCh 1333.Of78
Fluoruro	mg/L	0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	0,90	<0,50	0,13	0,21	1,00
Fosfato (como P)	mg/L	0,15	0,19	0,16	0,17	0,15	0,16	0,16	0,20			
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	1,97	2,54	8,55	1,45	16,4	14,9	0,75	1,65		5,00
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02			
Hierro (III)	mg/L	0,02	1,97	2,54	8,55	1,45	16,4	14,9	0,75			
Litio	mg/L	0,01	<0,01	3,57	<0,01	<0,01	1,48	0,11	<0,01	<0,01	<0,01	2,50
Litio Disuelto	mg/L	0,01	<0,01	3,48	<0,01	<0,01	1,42	0,10	<0,01	<0,01	<0,01	
Magnesio	mg/L	0,01	12,2	26,0	9,90	6,12	18,4	42,2	7,23	0,48	0,53	
Magnesio Disuelto	mg/L	0,01	11,4	25,3	8,23	5,87	17,1	41,2	6,59	0,27	0,38	
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	0,37	0,33	0,24	1,18	1,81	<0,01	<0,01		0,20
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005			0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		0,010
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		0,20
Nitrato	mg/L	0,02	0,59	2,06	1,21	0,24	1,51	0,62	0,52	2,47	6,13	
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	0,05	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	

Tabla 4-6: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°6 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 1333 Of78 (INN, 1978). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	PM1 08/1/14 10:00	PM2 08/1/14 11:00	PM3 08/1/14 11:30	PM4 08/1/14 12:35	PM5 08/1/14 14:15	PM6 08/1/14 13:45	PM9 08/1/14 12:00	PALI1 09/1/14 9:30	PALI2 09/1/14 11:30	NCh 1333.Of78
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03			
Plata	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		0,20
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		5,00
Potasio	mg/L	0,01	6,70	62,7	6,43	4,83	42,9	24,7	7,05	0,59	1,43	
Potasio Disuelto	mg/L	0,01	6,14	60,1	5,64	4,75	41,9	23,3	6,41	0,51	1,19	
Razón Absorción Sodio			1	16	3,7	0,7	8,6	2,6	0,7			
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		0,020
Sodio	mg/L	0,01	21,6	760	95,6	15,3	319	126	15,0	1,09	2,52	
Sodio Disuelto	mg/L	0,01	20,3	752	86,5	14,9	311	119	14,7	0,58	2,24	
Sodio Porcentual	%		28	77	60	26	69	36	27			35,00
Sólidos Totales	mg/L	5	281	2660	650	266	1752	1670	214			
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	272	2325	390	216	1104	992	184			
Sulfato	mg/L	0,02	81,0	347	63,0	123	204	440	32,0	4,28	11,4	250,00
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2			
Turbiedad	NTU	0,05	11,4	28,1	205	19,7	360	328	13,7			
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		0,10

4.1.1.2. Agua para Consumo

Los resultados de las mediciones de parámetros in situ y de los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de los lugareños (AP1, AP2, AP3, AP4, AP5, y AP6) de las Campañas de Terreno, se muestra en tablas por campaña, en las Tabla 4-7 a Tabla 4-10. Las tablas se ordenan mostrando el nombre de la muestra de acuerdo al punto de monitoreo muestreado, la fecha y hora de toma de muestra, y los resultados de las mediciones de parámetros in situ y análisis de laboratorio. En la última columna se muestra como referencia los valores máximos permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005), y dentro de la tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma.

El punto de monitoreo, AP1 presenta valores por fuera de lo permisible de pH y Aluminio en todas las Campañas de Terreno en que fue muestreado. El punto de monitoreo AP2, presenta valores por sobre lo permisible para agua potable según la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005) de Arsénico en todas las Campañas de Terreno en que fue muestreado. También muestra valores fuera de lo permisible de pH, Hierro, y Manganeso en una de las dos Campañas de Terreno.

El punto de monitoreo AP3, presenta valores por fuera de lo permisible para agua potable según la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005) de pH y Arsénico en al menos una de las dos Campañas de Terreno. El punto de monitoreo AP4, presenta valores por sobre lo permisible de Arsénico en todas las Campañas de Terreno en que fue muestreado. Además, tiene valores por sobre lo permisible de Hierro y Manganeso para una de las dos Campañas de Terreno. El punto de monitoreo AP5, presenta valores por fuera de lo permisible para agua potable según la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005) de pH en una de dos campañas de terreno. El punto de monitoreo AP6, presenta valores por fuera de lo permisible de Arsénico en las dos Campañas de Terreno.

Cabe destacar que la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005) no tiene como referencia un valor de límite permisible para el Boro, por lo que las aguas de estos puntos de monitoreo no pueden ser comparadas en este sentido. La Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) sugiere un límite de 0,5 mg/L de Boro en agua potable como límite provisorio, dada la dificultad de ser alcanzado en áreas donde el Boro se presenta naturalmente (WHO, 1998). Además según la EPA (2008) en distintos estados se exigen límites menos estrictos; desde 0,6 mg/L (Minnesota) hasta 1 mg/L (California), dada la dificultad de alcanzar límites más bajos con los sistemas de tratamientos usados. Si el límite sugerido por la WHO (1998) se aplicara en estas aguas, el punto de monitoreo AP1 presenta valores por sobre el límite en todas sus muestras, el punto AP2 en una de las dos muestras, el punto AP3 en dos de tres muestreos, los puntos AP5 y AP6 en una de dos monitoreos y el punto AP4 no sobrepasa el nivel permisible.

Tabla 4-7: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°2 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP1 29/5/13 10:00	AP2 29/5/13 12:30	AP3 29/5/13 13:30	AP4 30/5/13 10:50	AP5 30/5/13 11:40	AP6 30/5/13 12:15	NCh 409/1.Of2005
pH en terreno	u.a.		8,87	8,71	8,36	8,37	7,15	7,61	6,5-8,5
Temperatura en terreno	°C		0,52	2,20	7,26	1,02	7,90	6,13	
Conductividad en terreno	µS/cm		592	378	227	344	310	5	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		3,91	3,91	8,02	7,48	8,43	7,21	
Turbiedad en terreno	NTU		7,56	1,35	5,04	2,22	3,05	2,39	
Potencial Redox en terreno	mV		-16,2	-16,2	-19,4	-15,0	-16,3	-14,1	
Alcalinidad Total (CaCO3)	mg/L	0,2	376	136	88,0	188	58,0	36,0	
Aluminio	mg/L	0,05	<0,05	0,27	<0,05	0,16	0,10	0,09	
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	1,5
Amonio	mg/L	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,1570	0,03110	0,01110	0,01650	0,00864	0,02190	0,01
Arsénico (III)	mg/L	0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,15	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	
Bario	mg/L	0,01	0,61	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Bicarbonatos	mg/L	0,2	398	155	107	229	70,0	44,0	
Boro	mg/L	0,01	2,57	0,19	0,24	0,32	0,21	<0,01	
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01

Tabla 4-7: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°2 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Limite de Detección	AP1 29/5/13 10:00	AP2 29/5/13 12:30	AP3 29/5/13 13:30	AP4 30/5/13 10:50	AP5 30/5/13 11:40	AP6 30/5/13 12:15	NCh 409/1.Of2005
Calcio	mg/L	0,01	65,1	36,3	24,4	30,5	18,9	42,5	
Carbonatos	mg/L	0,2	30	5,4	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,05
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	3,0
Cloruro	mg/L	5,00	7,25	1,95	9,60	6,00	7,00	<5,00	400
Cobalto	mg/L	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Cobre	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	2,0
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	23	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	
Conductividad a 25 °C	µS/cm	1	611	394	233				
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Fluoruro	mg/L	0,5	0,08	0,16	0,13	<0,5	<0,5	<0,5	1,5
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	<0,01	5,13	<0,01	0,39	<0,01	<0,01	0,3
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	<0,02	5,13	<0,02	0,39	<0,02	<0,02	
Litio	mg/L	0,01	0,13	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Magnesio	mg/L	0,01	10,0	12,4	3,80	13,9	11,9	21,7	125,0
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	0,19	<0,01	0,14	<0,01	<0,01	0,1

Tabla 4-7: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°2 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP1 29/5/13 10:00	AP2 29/5/13 12:30	AP3 29/5/13 13:30	AP4 30/5/13 10:50	AP5 30/5/13 11:40	AP6 30/5/13 12:15	NCh 409/1.Of2005
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Nitrato	mg/L	0,02	0,04	<0,02	1,26	1,14	1,15	1,02	50
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	3
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Plata	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Potasio	mg/L	0,01	4,12	1,98	2,10	2,38	7,35	2,87	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Sodio	mg/L	0,01	76,1	29,8	22,4	18,0	16,5	11,9	
Sodio Porcentual	%		44	31	38	22	25	11	
Sólidos Totales	mg/L	5	423	490	185				
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	412	266	176	220	262	406	1.500
Sulfato	mg/L	0,02	7,32	91,2	27,0	13,0	87,0	193	500
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2				
Turbiedad	NTU	0,05	4,82	73,5	0,10	1,70	0,12	0,12	
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	

Tabla 4-8: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP1 06/9/13 12:25	AP2 06/9/13 13:30	AP3 06/9/13 11:10	AP4 06/9/13 8:50	AP5 06/9/13 10:20	AP6 06/9/13 10:44	NCh 409/1.Of2005
pH en terreno	u.a.		8,63	8,40	8,53	8,34	8,57	7,56	6,5-8,5
Temperatura en terreno	°C		13,30	14,10	14,60	2,29	8,29	7,91	
Conductividad en terreno	µS/cm		622	650	245	544	755	519	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		6,05	5,25	1,69	3,82	6,46	6,09	
Turbiedad en terreno	NTU		2,12	3,29	1,47	1,17	0,65	2,19	
Potencial Redox en terreno	mV		88,2	82,3	67,7	126,9	-26,7	90,8	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	348	192	81,0	219	57,0	38,0	
Aluminio	mg/L	0,05	0,15	0,12	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	1,5
Amonio	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,150	0,0326	0,00984	0,01330	0,00745	0,02120	0,01
Arsénico (III)	mg/L	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,149	0,0326	0,010	0,013	0,008	0,021	
Bario	mg/L	0,01	0,55	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	

Tabla 4-8: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP1 06/9/13 12:25	AP2 06/9/13 13:30	AP3 06/9/13 11:10	AP4 06/9/13 8:50	AP5 06/9/13 10:20	AP6 06/9/13 10:44	NCh 409/1.Of2005
Benilio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Bicarbonatos	mg/L	0,2	424	232	99,0	266	69,0	47,0	
Boro	mg/L	0,01	1,53	0,87	1,04	0,21	2,47	1,04	
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Calcio	mg/L	0,01	42,0	51,0	24,0	44,0	18,0	48,0	
Carbonatos	mg/L	0,2	<0,2	0,8	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,05
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	3,0
Cloruro	mg/L	5,00	9,00	7,00	12,0	<5,00	6,00	<5,00	400
Cobalto	mg/L	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Cobre	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	2,0
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	5,0	2,0	<1,8	<1,8	<1,8	<1,8	
Conductividad a 25 °C	µS/cm	1	598	623	238	429	299	475	
Cromo	mg/L	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05

Tabla 4-8: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP1 06/9/13 12:25	AP2 06/9/13 13:30	AP3 06/9/13 11:10	AP4 06/9/13 8:50	AP5 06/9/13 10:20	AP6 06/9/13 10:44	NCh 409/1.Of2005
Fluoruro	mg/L	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,5
Fosfato (como P)	mg/L	0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	1,2	1,0	
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	0,17	0,24	<0,01	0,27	0,06	0,05	0,3
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	0,17	0,24	<0,02	0,27	0,06	0,05	
Litio	mg/L	0,01	0,10	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Magnesio	mg/L	0,01	7,01	18,2	2,34	16,1	11,9	21,7	125,0
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Nitrato	mg/L	0,02	1,46	1,97	2,11	3,97	1,22	1,50	50
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	3

Tabla 4-8: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de las muestras de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°3 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP1 06/9/13 12:25	AP2 06/9/13 13:30	AP3 06/9/13 11:10	AP4 06/9/13 8:50	AP5 06/9/13 10:20	AP6 06/9/13 10:44	NCh 409/1.Of2005
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	
Plata	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Potasio	mg/L	0,01	4,63	2,42	1,92	1,15	6,79	1,83	
Razón Absorción Sodio			3,30	1,80	0,90	0,90	0,80	0,40	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Sodio	mg/L	0,01	87,8	57,5	17,4	27,2	18,0	13,6	
Sodio Porcentual	%		58	38	35	25	28	12	
Sólidos Totales	mg/L	5	408	445	186	288	270	430	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	389	416	182	266	258	400	1.500
Sulfato	mg/L	0,02	11,0	143	19,0	20,0	91,0	197	500
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	
Turbiedad	NTU	0,05	2,85	6,72	0,10	0,77	0,14	0,12	
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	

Tabla 4-9: Resultados de los parámetros medido en terreno y los análisis de laboratorio de la muestra de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°4 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP1 17/10/13 13:30	NCh 409/1.Of2005
pH en terreno	u.a.		8,94	6,5-8,5
Temperatura en terreno	°C		18,00	
Conductividad en terreno	µS/cm		579	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		1,82	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	360	
Aluminio	mg/L	0,05	<0,05	
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	1,5
Amonio	mg/L	0,03	<0,03	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,2860	0,01
Arsénico (III)	mg/L	0,002	0,005	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,281	
Bario	mg/L	0,01	0,34	
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	
Bicarbonatos	mg/L	0,2	403	
Boro	mg/L	0,01	1,55	
Boro Disuelto	mg/L	0,01	1,39	
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	0,01
Calcio	mg/L	0,01	40,0	
Calcio Disuelto	mg/L	0,01	37,0	
Carbonatos	mg/L	0,2	17,0	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	0,05
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	3,0
Cloruro	mg/L	5,00	14,0	400
Cobalto	mg/L	0,01	<0,01	
Cobre	mg/L	0,01	0,42	2,0
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	<1,8	
Conductividad a 25 °C	µS/cm	1	613	
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	0,05
Fluoruro	mg/L	0,50	<0,50	1,5
Fosfato (como P)	mg/L	0,15	0,3	

Tabla 4-9: Resultados de los parámetros medido en terreno y los análisis de laboratorio de la muestra de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°4 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP1 17/10/13 13:30	NCh 409/1.Of2005
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	0,13	0,3
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	0,13	
Litio	mg/L	0,01	0,20	
Litio Disuelto	mg/L	0,01	0,19	
Magnesio	mg/L	0,01	7,38	125,0
Magnesio Disuelto	mg/L	0,01	6,74	
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	0,1
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	
Nitrato	mg/L	0,02	1,73	50
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	3
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	
Plata	mg/L	0,01	<0,01	
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	0,05
Potasio	mg/L	0,01	6,46	
Potasio Disuelto	mg/L	0,01	6,19	
Razón Absorción Sodio			4	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	0,01
Sodio	mg/L	0,01	105	
Sodio Disuelto	mg/L	0,01	100	
Sodio Porcentual	%		62	
Sólidos Totales	mg/L	5	424	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	418	1.500
Sulfato	mg/L	0,02	<10,0	500
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0,2	
Turbiedad	NTU	0,05	1,93	
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	

Tabla 4-10: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de la muestra de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°5 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP3 21/11/13 12:50	NCh 409/1.Of2005
pH en terreno	u.a.		8,20	6,5-8,5
Temperatura en terreno	°C		11,55	
Conductividad en terreno	µS/cm		190	
Oxigeno Disuelto en terreno	mg/L		40,03	
Turbiedad en terreno	NTU		0,90	
Potencial Redox en terreno	mV		41,5	
Alcalinidad Total ($CaCO_3$)	mg/L	0,2	79	
Aluminio	mg/L	0,05	<0,05	
Amoniaco	mg/L	0,03	<0,03	1,5
Amonio	mg/L	0,03	<0,03	
Arsénico	mg/L	0,00042	0,01280	0,01
Arsénico (III)	mg/L	0,002	<0,002	
Arsénico (V)	mg/L	0,004	0,012	
Bario	mg/L	0,01	<0,01	
Berilio	mg/L	0,01	<0,01	
Bicarbonatos	mg/L	0,2	96,0	
Boro	mg/L	0,01	0,73	
Boro Disuelto	mg/L	0,01	0,59	
Cadmio	mg/L	0,01	<0,01	0,01
Calcio	mg/L	0,01	25,0	
Calcio Disuelto	mg/L	0,01	24,0	
Carbonatos	mg/L	0,2	<0,2	
Cianuro	mg/L	0,02	<0,02	0,05
Cinc	mg/L	0,01	<0,01	3,0
Cloruro	mg/L	5,00	13,0	400
Cobalto	mg/L	0,01	<0,01	
Cobre	mg/L	0,01	<0,01	2,0
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1,8	<1,8	
Cromo	mg/L	0,01	<0,01	0,05
Fluoruro	mg/L	0,50	<0,50	1,5

Tabla 4-10: Resultados de los parámetros medidos en terreno y los análisis de laboratorio de la muestra de agua de consumo de la Campaña de Terreno N°5 contrastando con los límites permitidos por la norma NCh 409/1.Of2005 (INN, 2005). (Continuación).

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	AP3 21/11/13 12:50	NCh 409/1.Of2005
Fosfato (como P)	mg/L	0,15	<0,15	
Hidróxido	mg/L	0,2	<0,2	
Hierro	mg/L	0,01	<0,01	0,3
Hierro (II)	mg/L	0,02	<0,02	
Hierro (III)	mg/L	0,02	<0,02	
Litio	mg/L	0,01	<0,01	
Litio Disuelto	mg/L	0,01	<0,01	
Magnesio	mg/L	0,01	3,02	125,0
Magnesio Disuelto	mg/L	0,01	2,92	
Manganeso	mg/L	0,01	<0,01	0,1
Mercurio	mg/L	0,0005	<0,0005	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01	<0,01	
Níquel	mg/L	0,01	<0,01	
Nitrato	mg/L	0,02	1,83	50
Nitrito	mg/L	0,02	<0,02	3
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,03	<0,03	
Plata	mg/L	0,01	<0,01	
Plomo	mg/L	0,01	<0,01	0,05
Potasio	mg/L	0,01	2,01	
Potasio Disuelto	mg/L	0,01	1,94	
Selenio	mg/L	0,001	<0,001	0,01
Sodio	mg/L	0,01	17,4	
Sodio Disuelto	mg/L	0,01	16,8	
Sodio Porcentual	%		33	
Sólidos Totales	mg/L	5	174	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	5	171	1.500
Sulfato	mg/L	0,02	28,0	500
Sulfuro Total	mg/L	0,2	<0,2	
Turbiedad	NTU	0,05	0,23	
Vanadio	mg/L	0,01	<0,01	

4.1.1.3. Caracterización Isotópica

La Tabla 4-11 presenta los resultados de los análisis isotópicos hechos para las muestras de la Campaña de Terreno N°1. Los análisis fueron realizador por la empresa Isotope Tracer Technologies Inc. por mandato de SGS. La metodología usada es Water Isotope Analysis Cavity Ring Down Spectroscopy, que tiene precisiones para $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de ±0,1‰ y ±0,6‰ respectivamente.

En cuanto al contenido de $\delta^{3}H$ en las aguas, si bien éstas no califican como aguas subterráneas, la Tabla 4-11 muestra que su contenido es menor a 3 U.T. Esto las clasifica como aguas con una recarga mayor a 20 años (respecto de 1972), lo que concuerda con aguas que están en una región árida.

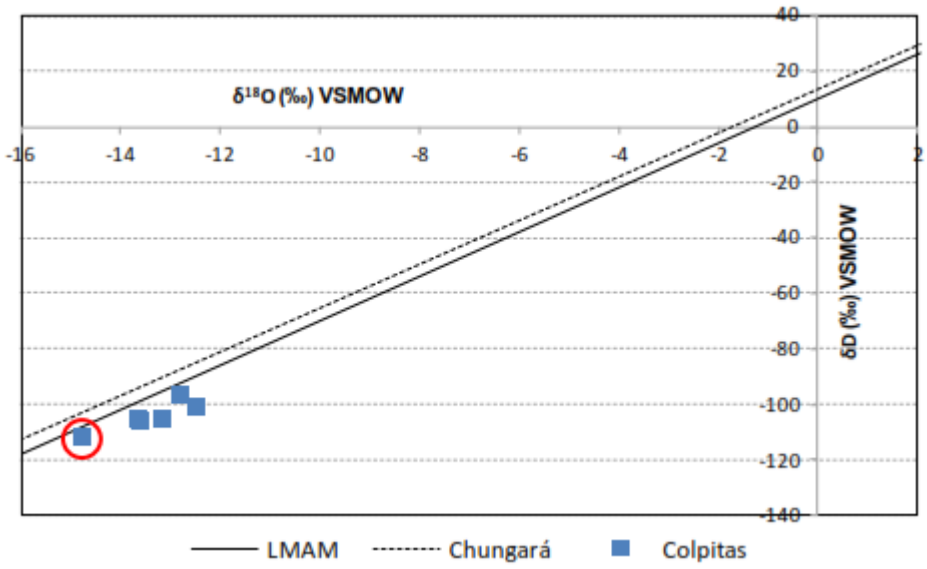
La Figura 4-1 muestra la LMAM (línea continua), la línea meteórica de las aguas del lago Chungará (línea discontinua, adaptada de Herrera et al., 2006), y los resultados de los análisis isotópicos para la Campaña de Terreno N°1 (cuadros azules). Todas las muestras se encuentran ubicadas muy cercanas a la LMAM, pero un poco hacia la derecha y por debajo de ella, lo que indica que tienen influencia de evaporación. Considerando que son aguas superficiales, y que están expuestas a altos niveles de radiación, este resultado es consistente con lo observado en terreno y con las condiciones geográficas de la zona.

La muestra correspondiente a PM1 está alejada del resto (encerrada en una circunferencia roja). Este punto está cercano al origen del río Colpitas, y la leve diferencia en la razón $\delta^{18}O/\delta^{2}H$ indica que podría estar influenciado por aguas subterráneas o sub-superficiales que dan origen al río Colpitas. La Tabla 4-19 del análisis de ANOVA de un factor nos indica que todas las muestras no tienen diferencia significativa, y por ende todas tienen el mismo origen.

Tabla 4-11: Resultados del análisis isotópico de las muestras de agua de la Campaña de Terreno N°1.

Parámetro		Unidad	PM1 20/3/13 12:00	PM2 20/3/13 17:15	PM3 20/3/13 16:00	PM4 20/3/13 16:40	PM5 20/3/13 14:40	PM6 20/3/13 13:50
δ18O	Aver	‰ VSMOW	-14,77	-13,15	-12,48	-13,6	-13,66	-12,81
	Stdv		0,07	0,05	0,06	0,05	0,06	0,03
δ2H	Aver	‰ VSMOW	-112,0	-105,0	-100,6	-106,3	-105,5	-96,4
	Stdv		0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2
E3H	Aver	U.T.	<0,8	<0,8	1	1,3	<0,8	<0,8
	Stdv		0,8	0,4	0,7	0,4	0,4	0,7

Figura 4-1: Composición isotópica de las muestras de la cuenca del río Colpitas, LMAM, y la línea meteórica local del lago Chungará.



4.1.2 Resultados de la Verificación de la Exactitud de los Análisis

Los resultados de la verificación de la exactitud de los análisis resultaron en solo unas pocas muestras fuera de los rangos aceptables, y que por lo general correspondieron a muestras con muy poca concentración de iones, o al contrario con mucha concentración de iones. Ambos extremos llevan a errores, pero que dada la naturaleza extrema de las muestras, resultan aceptables.

Una muestra en particular, muestra un error mayor que otras, es la muestra del punto de monitoreo Termal (Campaña de Terreno N°3). Este punto de monitoreo tiene características extremas (temperatura del agua mayor que 40°C), por lo que las mediciones de parámetros in situ se encuentran también bajo estas condiciones. No así los análisis de laboratorio, donde la muestra está a 25 ± 2°C, esta diferencia de temperatura pudo hacer que compuestos con solubilidades sensibles a la temperatura varíen en su concentración disuelta, y por ende existan grandes diferencias entre las mediciones en terreno y en el laboratorio.

Aceptando la gran diferencia de la muestra anterior, todas las muestras tienen resultados técnicamente válidos, por lo que son objeto de análisis en este informe.

4.1.2.1. Resultados de la Verificación por Análisis de Balance Iónico:

La verificación del balance iónico si bien, tomó en cuenta los criterios de la Tabla 2-6, estos fueron muy estrictos, y son aplicables a muestras de aguas menos concentradas

en iones, y con menos aportes de iones que no son medibles, por lo que se tomó un valor de ± 10% como una referencia válida para un balance iónico correcto.

Las Tabla 4-12 a Tabla 4-17 muestran en tablas por campaña, por cada muestra, el valor expresado como meq/L de las especies de cationes y aniones que se usaron en el balance, y luego muestra el resultado del balance iónico. Dentro de cada tabla se remarcó en rojo los valores que sobrepasan el ± 10% de referencia.

Tabla 4-12: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°1.

	Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6
CATIONES	Aluminio	meq/L	0,03	0,03	0,07	1,00	0,16	2,78
	Boro	meq/L	0,08	13,52	0,82	0,03	5,05	1,06
	Calcio	meq/L	1,56	5,24	1,15	0,60	4,26	3,60
	Hierro	meq/L	0,01	0,02	0,01	0,07	0,04	0,32
	Litio	meq/L	0,00	0,48	0,01	0,00	0,16	0,02
	Magnesio	meq/L	0,81	1,35	0,52	0,18	1,82	2,80
	Manganeso	meq/L	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,05
	Potasio	meq/L	0,13	1,49	0,10	0,09	1,09	0,48
	Sodio	meq/L	0,88	29,84	3,13	0,38	8,39	4,14
ANIONES	Bicarbonatos	meq/L	1,61	3,83	2,65	0,01	2,36	0,00
	Carbonatos	meq/L	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
	Cloruro	meq/L	0,08	27,14	1,61	0,03	11,20	5,53
	Fluoruro	meq/L	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03
	Fosfato (como P)	meq/L	0,06	0,01	0,08	0,02	0,08	0,07
	Nitrato	meq/L	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01
	Sulfato	meq/L	1,69	5,37	0,48	1,84	3,71	11,62
	∑ cationes		3,49	51,97	5,81	2,36	20,98	15,24
	∑ aniones		3,44	36,39	4,98	1,91	17,37	17,25
	Balance iónico %		0,7%	17,6%	7,7%	10,5%	9,4%	-6,2%

Tabla 4-13: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°2.

	Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	PM5	PM6	PM7	PM8	Termal	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6
CATIONES	Aluminio	meq/L	0,00	0,04	0,01	0,00	1,10	0,00	0,99	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,01	0,01
	Boro	meq/L	0,07	18,26	1,72	6,41	1,25	7,19	0,99	84,92	0,71	0,05	0,07	0,09	0,06	0,00
	Calcio	meq/L	1,08	5,19	0,99	3,03	2,54	2,94	2,52	9,08	3,25	1,81	1,22	1,52	0,94	2,12
	Hierro	meq/L	0,00	0,05	0,01	0,02	0,09	0,02	0,10	0,03	0,00	0,28	0,00	0,02	0,00	0,00
	Litio	meq/L	0,00	0,62	0,01	0,22	0,02	0,20	0,02	2,58	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Magnesio	meq/L	0,59	1,53	0,48	1,54	2,03	1,42	1,94	2,32	0,82	1,02	0,31	1,14	0,98	1,78
	Manganeso	meq/L	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
	Potasio	meq/L	0,10	1,38	0,07	1,20	0,33	1,12	0,32	6,29	0,11	0,05	0,05	0,06	0,19	0,07
	Sodio	meq/L	1,09	32,36	5,13	11,96	4,24	12,09	4,02	206,61	3,31	1,30	0,97	0,78	0,72	0,52
ANIONES	Bicarbonatos	meq/L	0,95	4,05	3,24	2,46	0,04	2,47	0,03	15,67	6,52	2,54	1,75	3,75	1,15	0,72
	Carbonatos	meq/L	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cloruro	meq/L	0,23	36,61	3,70	14,16	4,96	14,27	5,08	199,80	0,20	0,06	0,27	0,17	0,20	0,07
	Fluoruro	meq/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03	0,19	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Nitrato	meq/L	0,02	0,06	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,07	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
	Sulfato	meq/L	2,19	8,08	0,83	4,98	7,08	4,79	6,85	6,64	0,15	1,90	0,56	0,27	1,81	4,02
	Σ cationes		2,95	59,44	8,44	24,40	11,64	25,02	10,91	311,84	8,22	4,54	2,63	3,64	2,90	4,51
	Σ aniones		3,40	48,82	8,11	21,64	12,13	21,58	12,01	222,38	7,88	4,68	2,62	4,23	3,19	4,84
	Balance iónico %		-7,1%	9,8%	2,0%	6,0%	-2,1%	7,4%	-4,8%	16,7%	2,1%	-1,5%	0,2%	-7,4%	-4,8%	-3,6%

Tabla 4-14: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°3.

	Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	PM5	PM6	PM9	Termal	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6
CATIONES	Aluminio	meq/L	0,00	0,11	0,00	0,00	1,43	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	Boro	meq/L	0,53	18,95	2,50	5,66	0,98	0,29	81,87	0,42	0,24	0,29	0,06	0,69	0,29
	Calcio	meq/L	1,55	5,59	2,05	4,04	3,84	0,70	7,78	2,10	2,54	1,20	2,20	0,90	2,40
	Hierro	meq/L	0,02	0,10	0,00	0,02	0,15	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
	Litio	meq/L	0,01	0,67	0,03	0,21	0,03	0,00	3,10	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Magnesio	meq/L	0,89	1,57	1,17	1,76	2,93	0,39	1,81	0,58	1,50	0,19	1,32	0,98	1,78
	Manganeso	meq/L	0,00	0,01	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Potasio	meq/L	0,16	1,41	0,19	1,55	0,51	0,13	6,17	0,12	0,06	0,05	0,03	0,17	0,05
	Sodio	meq/L	1,00	29,14	7,83	16,49	5,18	0,96	131,27	3,82	2,50	0,76	1,18	0,78	0,59
ANIONES	Bicarbonatos	meq/L	1,03	3,72	3,70	2,44	0,02	1,36	15,57	6,95	3,80	1,62	4,36	1,13	0,77
	Carbonatos	meq/L	0,00	0,00	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cloruro	meq/L	0,20	37,18	5,70	16,84	5,42	0,68	184,94	0,25	0,20	0,34	0,07	0,17	0,07
	Fluoruro	meq/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Fosfato (como P)	meq/L	0,03	0,03	0,02	0,06	0,01	0,01	0,21	0,01	0,01	0,01	0,01	0,11	0,10
	Nitrato	meq/L	0,02	0,06	0,02	0,03	0,01	0,05	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06	0,02	0,02
	Sulfato	meq/L	2,25	7,27	1,31	6,29	6,08	0,44	6,83	0,23	2,98	0,40	0,42	1,89	4,10
	Σ cationes		4,15	57,55	13,76	29,74	15,09	2,47	232,03	7,08	6,87	2,49	4,81	3,53	5,11
	Σ aniones		3,54	48,27	11,50	25,67	11,57	2,55	207,60	7,48	7,06	2,41	4,93	3,34	5,08
	Balance iónico %		7,9%	8,8%	9,0%	7,3%	13,2%	-1,6%	5,6%	-2,8%	-1,3%	1,5%	-1,3%	2,7%	0,3%

Tabla 4-15: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°4.

	Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	PM5	PM6	PM9	Termal	AP1
CATIONES	Aluminio	meq/L	0,00	0,09	0,00	0,02	0,99	0,00	0,00	0,00
	Boro	meq/L	0,22	16,76	3,19	5,47	0,87	0,68	77,43	0,39
	Calcio	meq/L	1,40	5,64	2,50	3,49	3,24	1,00	9,33	1,85
	Hierro	meq/L	0,01	0,13	0,00	0,05	0,10	0,01	0,04	0,01
	Litio	meq/L	0,00	0,56	0,03	0,20	0,03	0,01	2,56	0,03
	Magnesio	meq/L	0,72	1,24	1,24	1,52	2,21	0,55	1,81	0,55
	Manganeso	meq/L	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
	Potasio	meq/L	0,13	1,89	0,16	1,46	0,41	0,16	6,37	0,16
ANIONES	Sodio	meq/L	0,80	34,54	10,35	14,62	4,83	1,85	152,11	4,35
	Bicarbonatos	meq/L	0,72	3,85	4,62	2,47	0,01	2,08	16,27	6,60
	Carbonatos	meq/L	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57
	Cloruro	meq/L	0,23	37,91	8,63	16,28	5,39	1,75	182,60	0,39
	Fluoruro	meq/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
	Fosfato (como P)	meq/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
	Nitrato	meq/L	0,02	0,08	0,03	0,03	0,02	0,05	0,04	0,03
	Sulfato	meq/L	2,23	7,12	1,79	5,29	5,18	0,58	6,29	0,10
	∑ cationes		3,28	60,86	17,48	26,84	12,71	4,28	249,66	7,33
	∑ aniones		3,22	48,99	15,90	24,09	10,64	4,49	205,22	7,74
	Balance iónico %		1,0%	10,8%	4,7%	5,4%	8,9%	-2,4%	9,8%	-2,7%

Tabla 4-16: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°5.

	Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM5	PM6	PM9	AP3
CATIONES	Aluminio	meq/L	0,00	0,10	0,06	1,13	0,00	0,00
	Boro	meq/L	0,08	22,40	7,74	0,93	1,43	0,20
	Calcio	meq/L	1,40	6,34	4,09	3,59	1,30	1,25
	Hierro	meq/L	0,00	0,17	0,12	0,11	0,01	0,00
	Litio	meq/L	0,00	0,69	0,26	0,03	0,02	0,00
	Magnesio	meq/L	0,69	1,56	1,81	2,79	0,83	0,25
	Manganeso	meq/L	0,00	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00
	Potasio	meq/L	0,12	2,16	1,69	0,48	0,23	0,05
	Sodio	meq/L	0,79	33,06	15,31	5,39	3,51	0,76
ANIONES	Bicarbonatos	meq/L	0,62	4,10	2,47	0,00	2,29	1,57
	Carbonatos	meq/L	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cloruro	meq/L	0,23	45,11	17,35	5,67	3,55	0,37
	Fluoruro	meq/L	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
	Fosfato (como P)	meq/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Nitrato	meq/L	0,01	0,05	0,04	0,01	0,03	0,03
	Sulfato	meq/L	2,46	7,64	5,70	6,79	1,00	0,58
	∑ cationes		3,08	66,48	31,09	14,48	7,34	2,51
	∑ aniones		3,37	56,92	25,59	12,51	6,90	2,58
	Balance iónico %		-4,4%	7,8%	9,7%	7,3%	3,1%	-1,3%

Tabla 4-17: Balance iónico para los resultados de los análisis químicos de la Campaña de Terreno N°6.

	Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6	PM9	PALI1	PALI2
CATIONES	Aluminio	meq/L	0,14	0,15	0,77	0,55	1,53	2,56	0,06	0,11	0,00
	Boro	meq/L	0,14	14,46	1,10	0,05	5,69	0,91	0,12	0,00	0,00
	Calcio	meq/L	1,55	5,94	1,55	1,25	3,54	4,99	0,90	0,15	0,28
	Hierro	meq/L	0,11	0,14	0,46	0,08	0,88	0,80	0,04	0,09	0,00
	Litio	meq/L	0,00	0,50	0,00	0,00	0,20	0,01	0,00	0,00	0,00
	Magnesio	meq/L	0,94	2,08	0,68	0,48	1,41	3,39	0,54	0,04	0,04
	Manganeso	meq/L	0,00	0,01	0,01	0,01	0,04	0,07	0,00	0,00	0,00
	Potasio	meq/L	0,16	1,54	0,14	0,12	1,07	0,60	0,16	0,02	0,04
	Sodio	meq/L	0,88	32,71	3,76	0,65	13,53	5,18	0,64	0,05	0,11
ANIONES	Bicarbonatos	meq/L	1,69	3,61	2,72	0,00	2,23	0,00	1,39	0,33	0,16
	Cloruro	meq/L	0,25	37,26	2,51	0,07	15,23	5,22	0,31	0,06	0,16
	Fluoruro	meq/L	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01
	Fosfato (como P)	meq/L	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
	Nitrato	meq/L	0,01	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,04	0,10
	Sulfato	meq/L	1,69	7,22	1,31	2,56	4,25	9,16	0,67	0,09	0,24
	∑ cationes		3,91	57,52	8,48	3,19	27,90	18,50	2,47	0,46	0,47
	∑ aniones		3,67	48,16	6,60	2,67	21,76	14,46	2,41	0,53	0,67
	Balance iónico %		3,1%	8,9%	12,5%	9,0%	12,4%	12,3%	1,2%	-6,9%	-17,9%

Como resultado del Balance Iónico, a pesar de que algunas muestras presentaron balances con una variación sobre el ± 10% referenciado como válido, se tomaron como balances validados a todos los resultados. Se comprende que la especiación de algunos cationes o aniones puede sufrir variación en su carga electrónica dependiendo del pH de cada una de las muestras, que a su vez varía con la temperatura y la exposición al CO_2 ambiental. Por esto las muestras más concentradas en iones tienden a tener una diferencia mayor entre la suma de equivalentes de cationes y aniones. Una explicación diferente merece la muestra de Agua Lluvia P2 de la Campaña de Terreno N°6, que al tener poca concentración de iones, una leve diferencia es, porcentualmente, muy significativa.

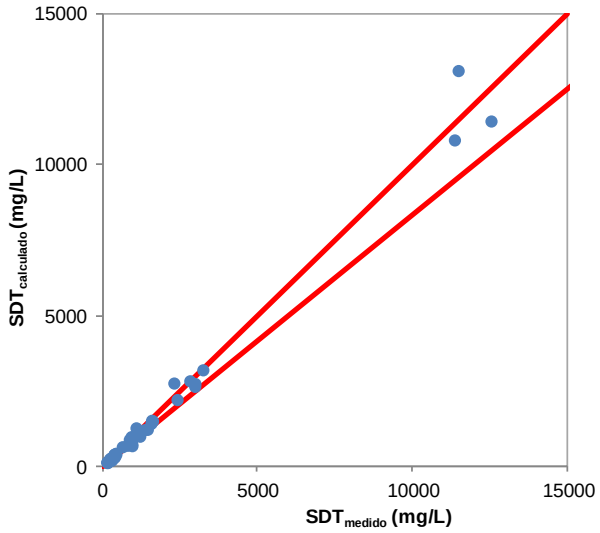
4.1.2.2. Resultados de la Verificación por Comparación de SDT_{medido} vs $SDT_{calculado}$

Esta verificación se presenta de modo gráfica en la Figura 4-2, donde se muestran los resultados de las mediciones de todos las muestras de agua de todos los puntos de monitoreo de todas las campañas, exceptuando los puntos de monitoreo de agua lluvia, que no tuvieron cantidad de muestra suficiente para realizar este análisis.

Como se observa en la Figura 4-2, se muestran dos líneas rojas que representan, por sus pendientes 1,0 y 1,2, el rango de error aceptable que es el área dentro de las líneas. Se observa que la mayor parte de los puntos se reúne en relativas bajas concentraciones de SDT (menores a 2.500 mg/L), y que todas estas comparaciones están dentro del rango aceptable.

Los dos pares de datos que caen fuera del rango aceptable corresponden al punto Termal (Campaña de Terreno N°2) y al punto PM2 (Campaña de Terreno N°6). El primero se explica por la gran cantidad de SDT, ya que la muestra en condiciones ambientales se encontraba a más de 40°C, por lo que las mediciones de los parámetros a temperatura ambiente (cercana a 25°C en el laboratorio), puso afectar algunos parámetros sensibles a la temperatura en cuanto a la solubilidad. El punto PM2, que se encuentra por debajo del rango aceptable, se explica porque es posible que algún parámetro aportante no se esté tomando en cuenta en la suma de $SDT_{calculado}$.

Figura 4-2: Razón entre SDT_{medido} vs $SDT_{calculado}$ con referencias de rango de error como líneas rojas.



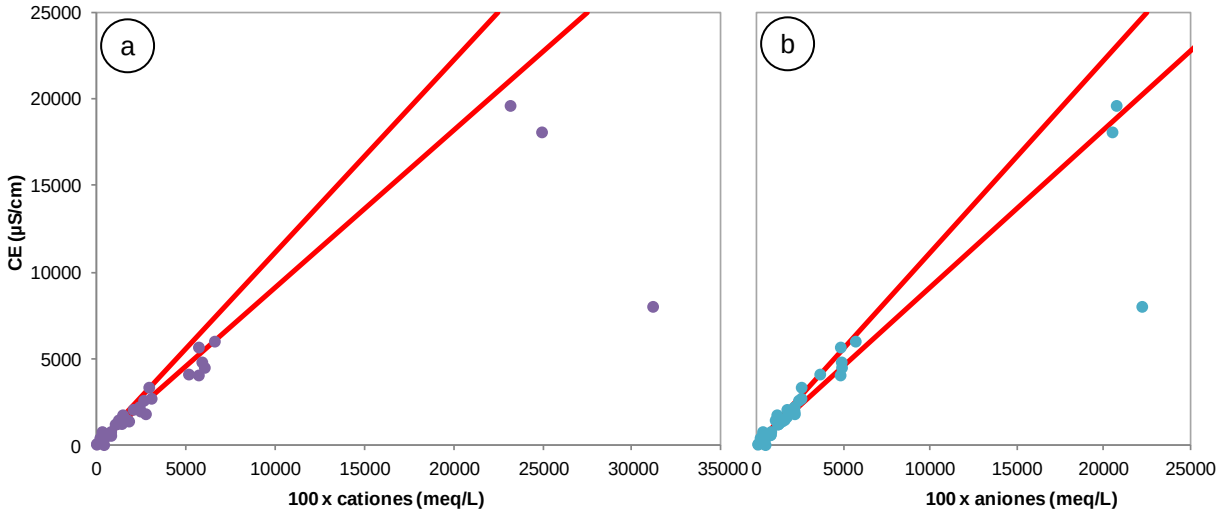
4.1.2.3. Resultados de la Verificación por Comparación de CE y ∑ iones

Esta verificación se compara de forma gráfica separando cationes de aniones en las Figura 4-3a) y Figura 4-3b) respectivamente. Se observa que, ninguna medición ni de cationes, ni de aniones está por debajo del rango aceptable. Además se observa que hay más muestras de cationes que quedan por sobre el rango aceptable, y menos muestras de aniones.

La muestra que se observa más lejana en ambos gráficos, corresponde al punto de monitoreo Termal (Campaña de Terreno N°3), como ya se explicó, debido a la alta temperatura de toma de muestras, es posible que el análisis a una menor temperatura no sea representativo de la CE medida en terreno.

Otras muestras que se presentan por fuera del rango aceptable, fueron aceptadas, dado el poco error que tenían sobre mediciones de CE a temperatura de análisis de laboratorio, y dado que el error no fue significativamente (p = 0,95) diferente de las demás mediciones.

Figura 4-3: Razón entre a) cationes vs CE, y b) aniones vs CE, con referencias de rango de error como líneas rojas.



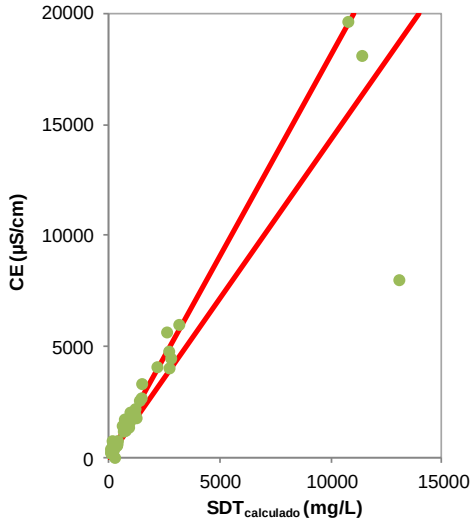
4.1.2.4. Resultados de la Verificación por Comparación de $SDT_{calculado}$ vs CE

Esta comparación se muestra de forma gráfica en la Figura 4-4. Se observa que algunas muestras quedan por debajo del rango aceptable, comprendido por el área entre las rectas rojas. Estas muestras se explican pues en el cálculo de SDT no se incluyeron todos los componentes aportantes.

Se observa que hay una muestra que queda por debajo del rango aceptable, que es la muestra del punto de monitoreo Termal (Campaña de Terreno N°3). Como ya se

explicó este punto de monitoreo tiene una temperatura muy superior a la temperatura de análisis, por lo que existen diferencias entre los resultados de laboratorio y las mediciones de parámetro in situ, sumado a que no se están tomando en cuenta todos los componentes aportantes de SDT.

Figura 4-4: Razón entre $SDT_{calculado}$ vs CE con referencias de rango de error como líneas rojas.

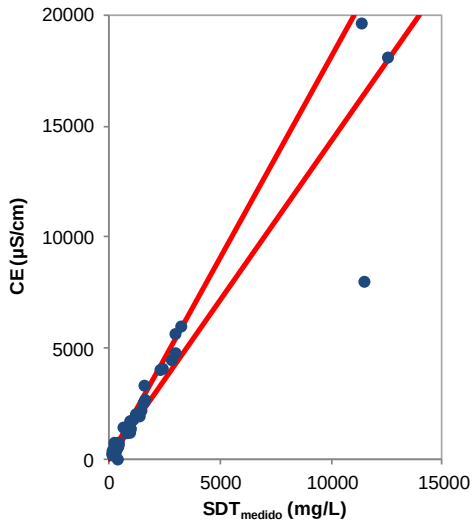


4.1.2.5. Resultados de la Verificación por Comparación de SDT_{medido} vs CE

Esta verificación se compara de forma gráfica, como muestra la Figura 4-5. Se observa que prácticamente todas las mediciones caen dentro del rango aceptable, comprendido por el área dentro de las dos rectas rojas.

La muestra que queda por fuera del rango aceptable es el punto (Campaña de Terreno N°3), que por razones de diferencias de solubilidad de componentes entre la temperatura ambiental, y la temperatura de análisis en laboratorio, se deben las diferencias entre los análisis y las mediciones de CE in situ.

Figura 4-5: Razón entre SDT_{medido} vs CE con referencias de rango de error como líneas rojas.



4.1.3 Resultado del Análisis Estadístico

Los análisis estadístico permitieron trabajar con agrupaciones de datos normalizados y estadísticamente válidos, por lo que se tiene completa seguridad de que los datos usados en las interpretaciones responden a un reflejo de lo que ocurre en cada punto de monitoreo.

4.1.3.1. Resultado de la Eliminación de Datos

Para un total de 2.313 datos de mediciones mensuales esporádicas desde 1956 de los parámetros de calidad Arsénico (mg/L), bicarbonato (mg/L), Boro (mg/L), Calcio (mg/L), carbonato (mg/L), cloruro (mg/L), Cobre (mg/L), CE (µS/cm), Hierro (mg/L), Magnesio (mg/L), pH (u.a.), Potasio (mg/L), Sodio (mg/L), y sulfato (mg/L), se eliminaron 3 datos espurios de mínima, y 23 datos espurios de máxima, logrando así agrupaciones normales de datos para cada parámetro.

4.1.3.2. Resultados de ANOVA de un Factor

La aplicación de este análisis estadístico a dos o más grupos de datos resultó en la integración válida de datos de distintas procedencias, tanto temporales como con diferencias de metodologías analíticas químicas. Cada comparación es acompañada de una descripción de los grupos de datos comparados y del resultado del ANOVA de un factor en forma de tablas resumidas.

1. La Tabla 4-18 muestra el resultado de la comparación de los datos de cada punto de monitoreo para las distintas campañas. Como se observa, en ningún caso el valor de F sobrepasa el valor de F crit, por lo que es posible afirmar que no hay

diferencias significativas (p = 0,16-0,99) entre los resultados de las campañas para cada punto de monitoreo. Con esto, es estadísticamente válido hacer un promedio de los datos de cada punto de monitoreo.

Tabla 4-18: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de los datos de las campañas AMEC entre cada punto de monitoreo.

Punto de monitoreo	F	P-value	F crit
PM1	0,36	0,88	2,24
PM2	0,18	0,97	2,24
PM3	1,46	0,22	2,40
PM4	0,19	0,67	3,92
PM5	0,28	0,93	2,24
PM6	0,34	0,89	2,24
PM9	1,41	0,24	2,64
Termal	0,01	0,99	3,05
AP1	0,02	0,98	3,05
AP2	0,45	0,50	3,93
AP3	0,0004	0,98	3,93
AP4	1,21	0,27	3,93
AP5	0,82	0,37	3,93
AP6	1,98	0,16	3,93

2. La Tabla 4-19 muestra el resultado de la comparación del análisis isotópico de los puntos de monitoreo de la Campaña de Terreno N°1. Los resultados muestran que F no supera el valor de F crit, por lo que las muestras y así, los puntos de monitoreo no tienen diferencia significativa (p = 1,00) para este tipo de análisis.

Tabla 4-19: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación del análisis isotópico de las muestras de la Campaña de Terreno N°1.

Comparación	F	P-value	F crit
PM1-PM2-PM3-PM4-PM5-PM6	0,003	1,00	2,53

3. La Tabla 4-20 muestra los resultados de la comparación de duplicados analíticos de los puntos de monitoreo PM5 y PM6, que son respectivamente las muestras PM7 y PM8 de la Campaña de Terreno N°2. Como se observa los valores de F no sobrepasan los valores de F crit, por lo es correcto decir que no existe diferencia significativa (p = 0,93-0,95) entre los duplicados analíticos de las muestras. Lo que significa que el método desde el muestreo hasta la entrega de los datos de los parámetros de calidad del agua es estadísticamente válido.

Tabla 4-20: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de muestras duplicado en los puntos de monitoreo PM5 y PM6 para la Campaña de Terreno N°2.

Comparación	F	P-value	F crit
PM7-PM5	0,009	0,93	3,93
PM8-PM6	0,004	0,95	3,93

4. La Tabla 4-21 muestra el resultado de la comparación de los datos históricos de INGENDESA (1993b) y DICTUC (2008b) con los datos de las Campañas de Terreno de AMEC para los puntos de monitoreo PM5 y PM6. Se observa que los valores de F no sobrepasan los valores de F crit, por lo que no existe diferencias significativas (p = 0,82-0,95) entre las dos agrupaciones de datos, y es posible integrarlas.

Tabla 4-21: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de los valores históricos y de las Campañas de Terreno para los puntos PM5 y PM6.

Comparación	F	P-value	F crit
PM5 histórico-PM5 AMEC	0,004	0,95	4,23
PM6 histórico-PM6 AMEC	0,05	0,82	4,23

5. La Tabla 4-22 muestra los resultados de la comparación de los datos de las distintas campañas de terreno de los datos entregados por Energía Andina (2013). Como se observa, ningún valor de F sobrepasó el valor de F crit, lo que indica que los datos no tiene diferencias significativas (p = 0,53-1,00) entre las campañas para cada punto de monitoreo, y pueden ser promediados entre sí.

Tabla 4-22: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de los valores de los puntos de monitoreo de Energía Andina (2013).

Punto de Monitoreo	F	P-value	F crit
CP1 Muyune	0,16	0,98	2,27
Ca1 Minaza	0,25	0,96	2,13
Ca2 Cuiba Jabira	0,61	0,73	2,13
Ca3 Pujiara	0,85	0,53	2,13
Ca4 Putrero	0,10	1,00	2,13
Ca5 Chañonaza	0,14	0,99	2,13

6. La Tabla 4-23 muestra el resultado de la comparación entre los puntos de Energía andina (2013) Ca1 Minaza y Ca2 Cuiba Jariba con los puntos de monitoreo AP4 y PM1 respectivamente. Esta comparación se realizó para poder tener una mayor cantidad de datos en cada punto de monitoreo. Como se observa, el valor de F no sobrepasa el valor de F crit, por lo que ambas comparaciones no tienen diferencias significativas (p = 0,81-0,99), y los datos pueden ser integrados.

Tabla 4-23: Resultados de ANOVA de un factor para la comparación de los puntos de monitoreo Ca1 Minaza y Ca2 Cuiba Jabira con los puntos AP4 y PM1 respectivamente.

Comparación	F	P-value	F crit
Ca1 Minaza-AP4	0,0001	0,99	3,97
Ca2 Cuiba Jabira-PM1	0,06	0,81	3,97

4.1.4 Diagramas Hidroquímicos

Los análisis estadísticos muestran que los datos de INGENDESA (1993b), DICTUC (2008), y Energía Andina (2013) pueden ser incorporados para un análisis más robusto en cantidad de datos y así tener menor sesgo temporal. La Tabla 4-24 muestra un promedio de todas las mediciones de cada punto de monitoreo para parámetros seleccionados. Con estos promedios se han construido los diagramas de Piper y de Stiff que se analizan a continuación.

Para un análisis más a fondo de la confluencia Colpitas-Caracarani, se ha analizado la variación temporal mensual de los parámetros seleccionados en los puntos PM5, PM6, y Lluta en Alcérreca.

Tabla 4-24: Datos promedio (1956-2014) para parámetros seleccionados en puntos de monitoreo.

Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6	PM9	Termal	CP1	Ca1	Ca3	Ca4	Ca5
pH	u.a.	8,20	7.48	8,67	6,42	7,75	4,97	8,30	6,30	7,66	8,25	7,94	7,36	7,61
CE	µS/cm	341	4.829	938	321	2.427	1.530	404	15.220	125	324	3.980	5.043	4.652
Alcalinidad Total como ($CaCO_3$)	mg/L	92,85	193,17	189,60	0,35	120,33	0,63	89,25	792,67	70,50	223,29	275,86	233,71	218,29
Arsénico	mg/L	0,1076	1,4903	0,1742	0,0112	0,4044	0,1326	0,0349	8,7733	0,0080	0,0191	0,8774	1,4000	1,0744
Bicarbonato	mg/L	113,23	235,50	206,80	0,40	131,63	32,76	108,75	966,33	86,00	272,29	336,43	285,14	266,86
Boro	mg/L	6,58	60,57	7,01	0,19	19,85	4,33	2,38	296,67	-	0,45	84,57	105,57	83,21
Calcio	mg/L	39,99	116,17	34,16	19,05	75,28	71,20	20,50	175,33	12,33	40,14	99,29	145,00	136,57
Cloruro	mg/L	6,84	1.307,00	157,00	1,82	537,28	225,17	55,75	6.704,00	4,08	9,14	1.090,00	1.426,71	1.283,71
Hierro	mg/L	0,49	1,92	1,82	1,35	0,99	4,93	0,36	0,50	0,20	0,61	0,99	2,57	2,23
Magnesio	mg/L	11,67	19,90	10,84	4,15	27,84	37,7	7,47	24,33	4,30	18,00	19,14	21,71	21,86
Nitrato	mg/L	0,89	3,10	1,15	0,13	1,55	0,81	2,13	3,11	1,18	-	-	-	-
Potasio	mg/L	10,65	66,75	5,67	4,11	57,29	23,90	7,15	250,67	2,73	3,26	81,57	88,71	64,36
Sodio	mg/L	84,40	751,00	143,10	12,05	343,95	134,12	43,00	3.814,33	7,57	23,57	825,57	1.083,86	717,71
SDT	mg/L	242	2.810	538	195	1.438	955	269	11.813	117	237	1.939	3.195	2.750
Sulfato	mg/L	92,32	341,83	55,04	105,65	441,06	658,48	32,25	316,33	39,17	22,14	117,00	321,43	314,57

4.1.4.1. Resultado del Diagrama Piper

La Figura 4-6 muestra el diagrama de Piper con la distribución de los iones mayoritarios en los diagramas ternarios inferiores, y con la distribución de círculos representativos de los SDT en el diamante proyectado. Se observa que el punto de muestreo Termal es aquel que tiene mayor SDT, seguido con concentraciones menores por otras muestras como Ca5, Ca4, Ca3, y PM2. Luego, las muestras de los puntos PM5 y PM6 se observan en círculos menores, y el resto de los puntos de monitoreo casi no alcanza a aparecer por la gran diferencia existente entre el valor menos y el mayor.

En el diagrama de Piper es posible agrupar las muestras en facies hidroquímicas dentro de cada diagrama ternario de cationes o aniones, se observa que los cationes son más bien acotados, mientras que se presenta una gran diversidad de aniones:

- Cationes (diagrama ternario izquierdo): se observa gran cantidad de muestras de agua tipo sódicas (esquina inferior derecha), y otras muestras del tipo sódicas-cálcicas-magnésicas (centro del diagrama ternario). Estos dos tipos de aguas se entienden, ya que muchas tienen orígenes entre minerales como Halita, especialmente aquellas aguas que nacen de las borateras o están afectadas por ellas. Las aguas del tipo sódicas-cálcicas-magnésicas son aquellas que tienen una mezcla de las nacientes o afectadas por las borateras, más aguas consideradas de mejor calidad.

- Aniones (diagrama ternario derecho): se observa una distribución mayor entre los aniones, teniendo aguas cloruradas, sulfatadas, bicarbonatadas, y cloruradas-sulfatadas-bicarbonatadas. Estos tipos de agua tienen que ver con el origen de las mismas, aguas cloruradas por lo general provendrán desde cercanías de depósitos de Halita, en cambio aguas bicarbonatadas se relacionan más con aguas superficiales.

4.1.4.2. Resultados de los Diagramas de Stiff

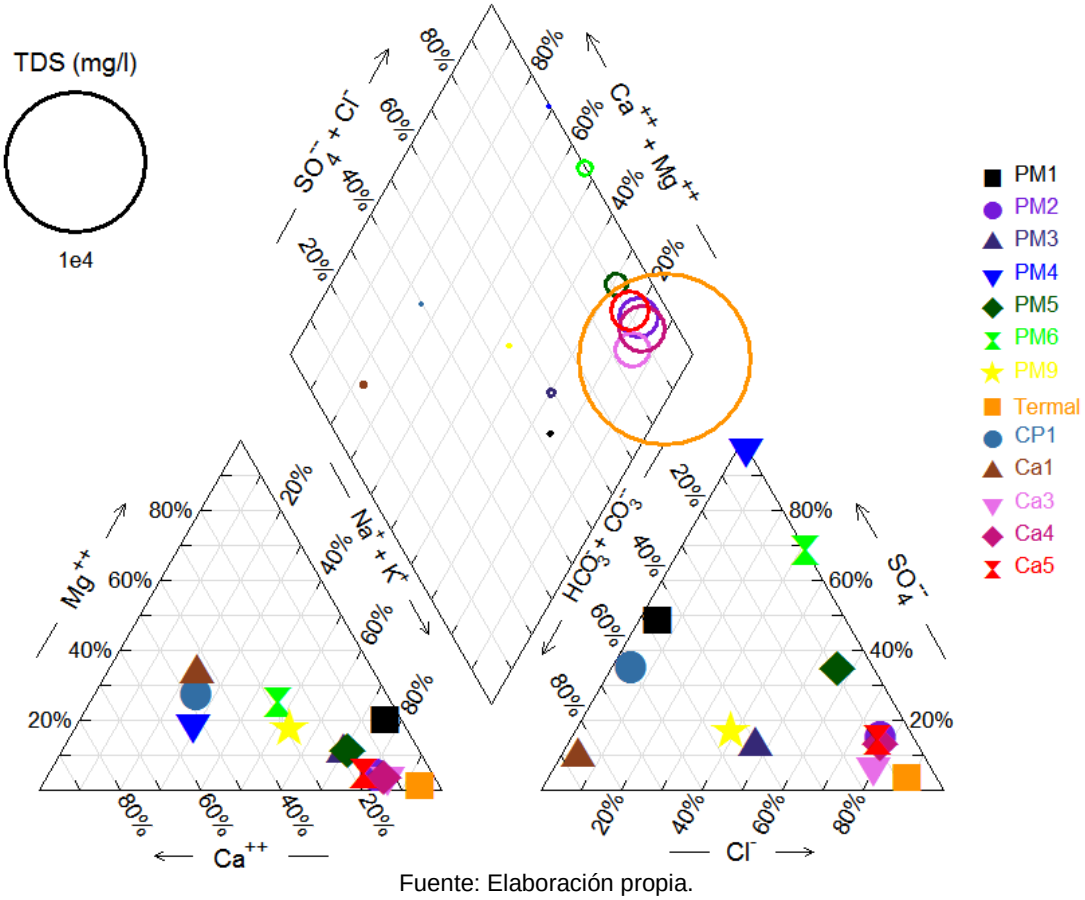
En la Figura 4-7 se observa la distribución de los elementos mayoritarios en diagramas de Stiff para cada punto de monitoreo. Esta figura muestra con polígonos la evolución de la composición de iones mayoritarios en la cuenca del río Colpitas.

En este caso, es importante notar la escala de los gráficos, mientras que el punto Termal presenta una escala de hasta 200 meq/kg, el resto de los puntos tiene una escala de hasta 50 meq/kg. Además los distintos tipos de agua, diferenciados por las distintas formas de sus polígonos se han diferenciado además con distintos colores, para facilidad de la interpretación. Así, los polígonos azules correspondientes a los puntos Ca3, Termal, Ca4, Ca5, PM2, y PM5 son de agua tipo clorurada sódica, fuertemente influenciada por la Halita presente en las borateras.

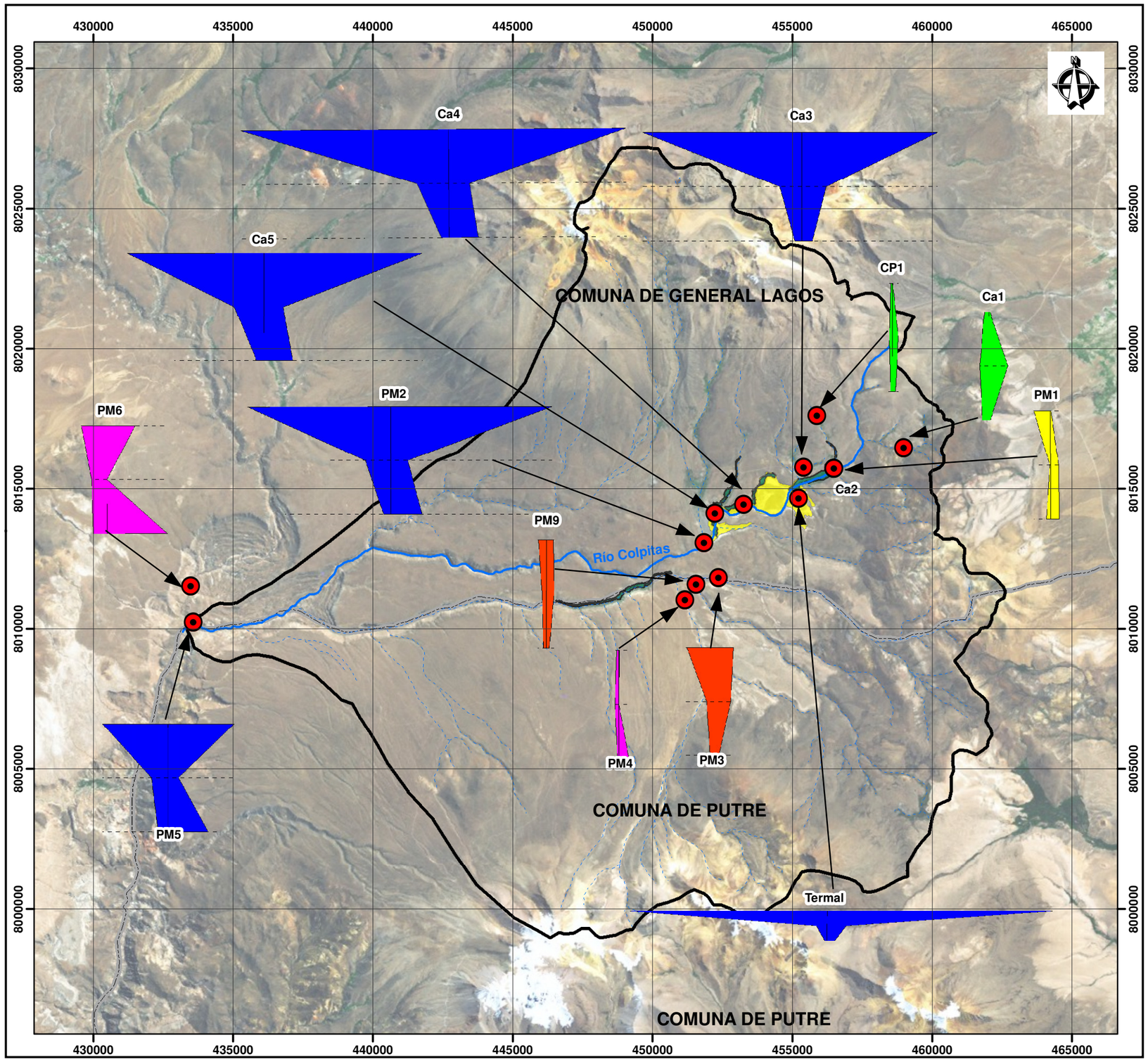
Otros puntos de monitoreo con aquellos con diagramas de Stiff color verde, los puntos CP1 y Ca1 tiene aguas tipo bicarbonatada cálcica, lo que indica que son aguas de distinto origen y de mejor calidad. El punto PM1, si bien es un agua que también tiene mejor calidad, es de origen levemente distinto, resultando ser del tipo bicarbonatada sulfatada sódica.

Las aguas de los puntos de monitoreo PM3 yPM9 tienen aguas del tipo bicarbonatadas cloruradas sódicas, si bien están influenciadas por la Halita presente en el suelo, al ser aguas del tipo más superficial, tiene un alto componente del anión bicarbonato. Otras aguas como los puntos PM6 y PM4, que no tienen el mismo origen, ya que el punto PM6 es el río Caracarani antes de la confluencia de Colpitas, y PM4 es un afluente de Allane a Colpitas, tienen aguas tipo sulfatadas cálcicas a pesar que entre ellas no tengan el mismo origen.

Figura 4-6: Diagrama de Piper.



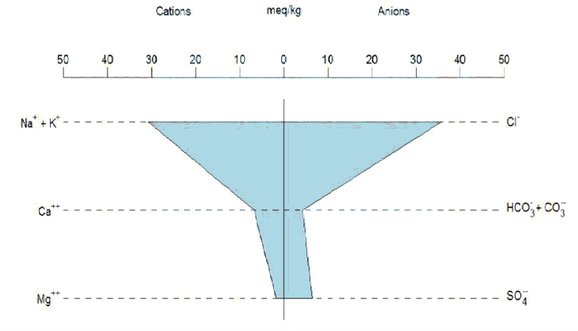
Fuente: Elaboración propia.

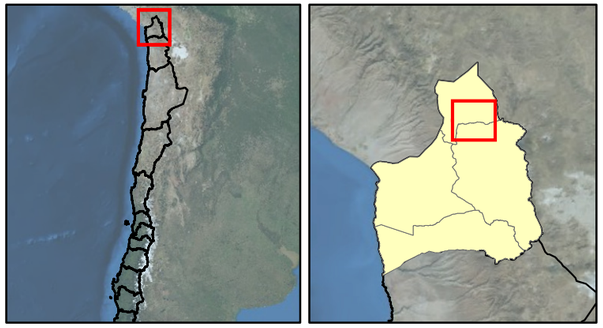


Leyenda

- Punto de monitoreo
- Río
- Quebrada
- Bofedales
- Borateras
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal

Leyenda Gráfico





TITULO

Variación espacial de diagramas de Stiff

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

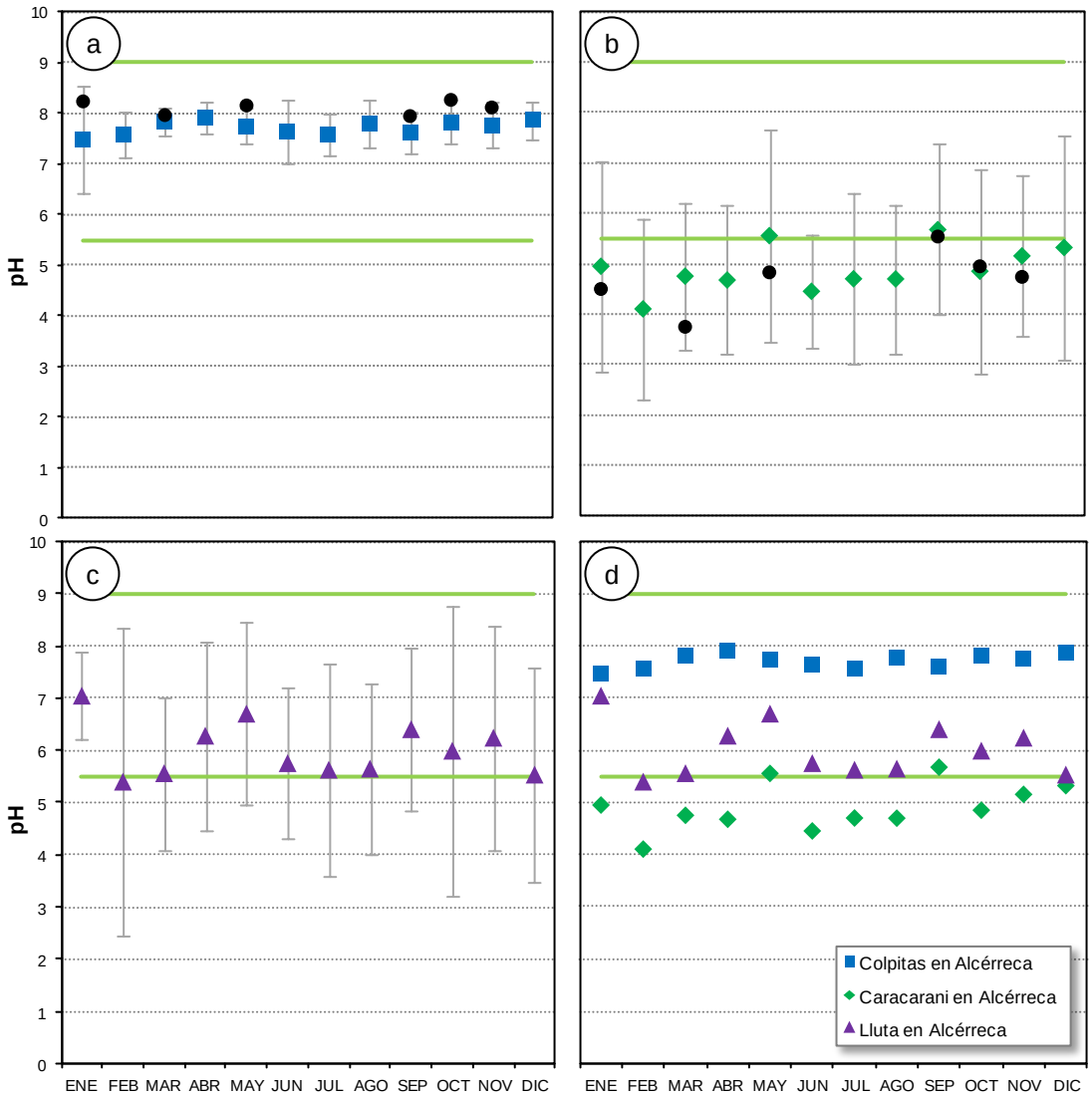
PREPARADO POR:	CLIENTE:			
amec	Dirección General de Aguas			
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:		FIGURA
E90008	1:130.000	2 1 0 2 Km		4-7

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\Figura 4-7\E90008_fig_4-7.mxd

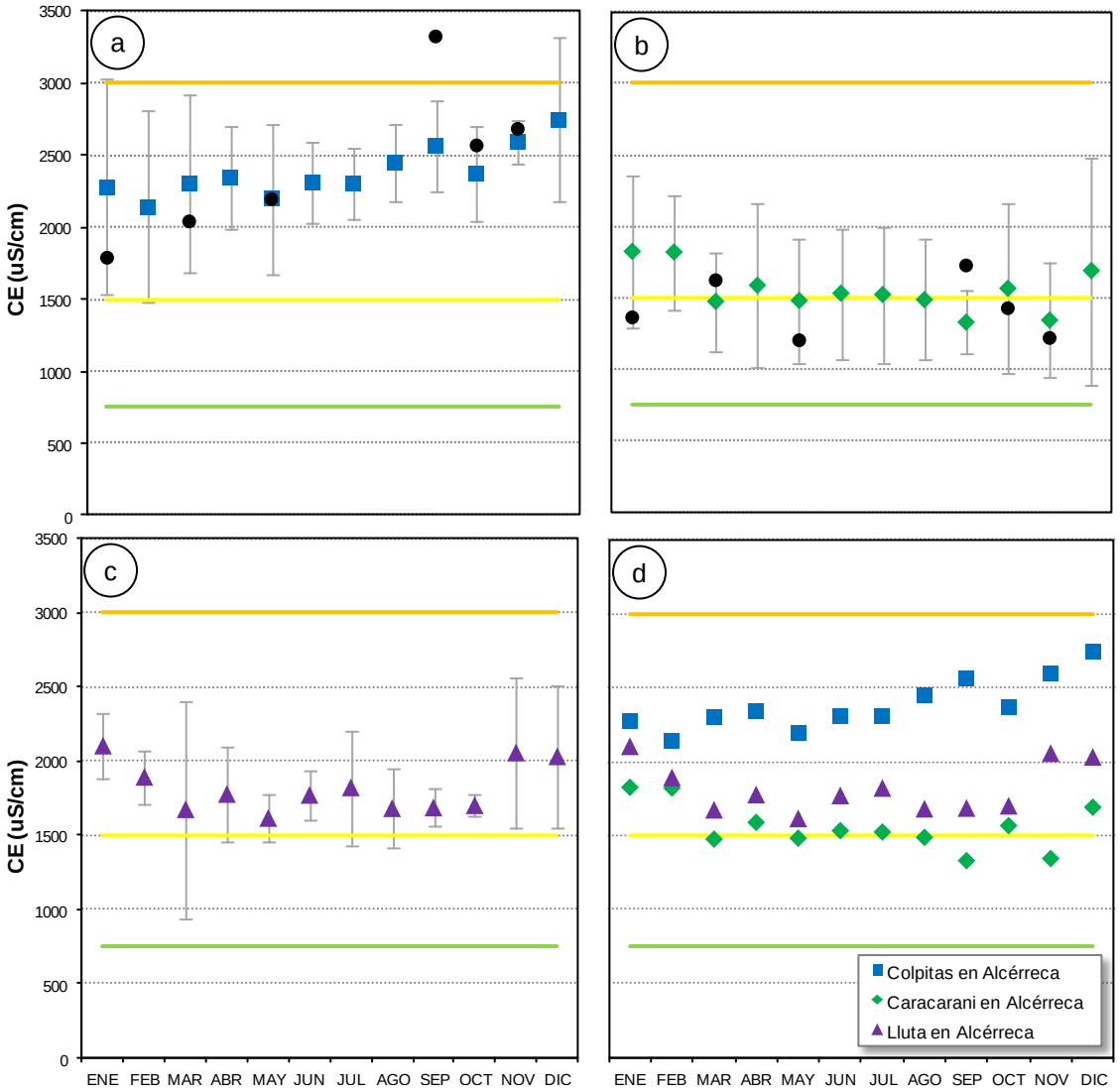
La Figura 4-8 y la Tabla 4-24 muestran que si bien, la mayoría de los puntos de monitoreo presentan un pH alcalino, el punto PM6 presenta un pH levemente ácido. Que es constante en el periodo de un año. Así la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango permitido por la norma NCh 1333Of.78 (INN, 1978) (rango comprendido entre líneas verdes de la Figura 4-8). El punto de monitoreo Termal presenta un pH neutro ligeramente ácido, asociado a aguas geotérmicas. Figura 4-8d, muestra que el punto PM5 es mucho más estable en las mediciones mensuales, esto puede deberse a que el alto contenido de Boro de las aguas forma un buffer ácido-base que mantiene el pH del agua en un pH alrededor de la neutralidad.

Figura 4-8: Variación mensual del pH en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



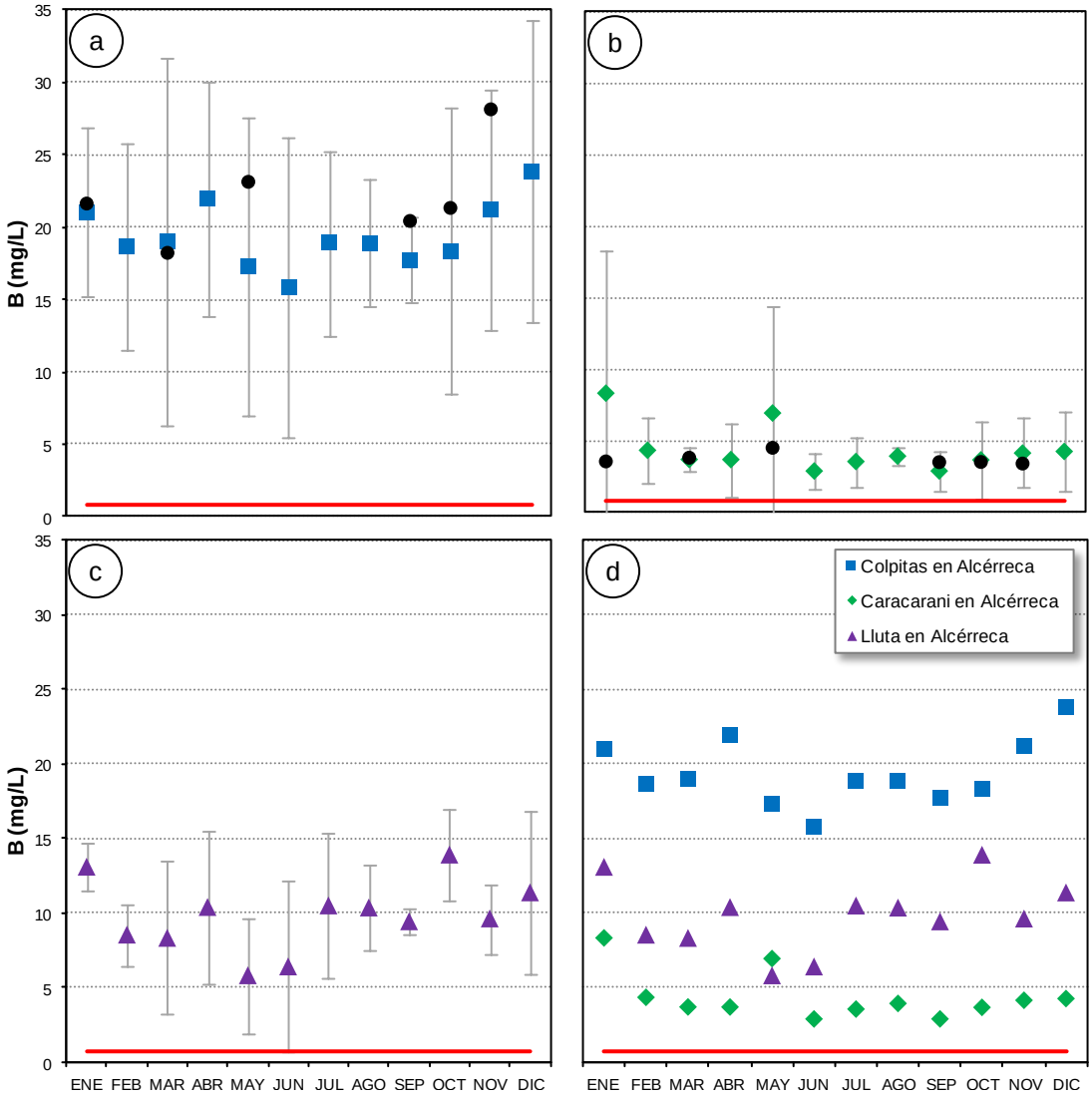
La Figura 4-9 y la Tabla 4-24 muestran que existe gran variedad de valores de CE para los puntos de monitoreo. Esto se evidenció por la gran variedad de clasificaciones por salinidad que sufrieron las aguas, desde “Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales” hasta “Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso”. Pero por lo general la mayor cantidad de agua se encuentra en un rango de alta CE y por ende alta salinidad. Aguas de menores concentraciones de CE son usadas como agua de consumo por la población. La Figura 4-9 muestra que no existe una gran variación mensual en los puntos de monitoreo, y por ende es posible encentrar la misma concentración de CE casi todo el año.

Figura 4-9: Variación mensual de la CE (µS/cm) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



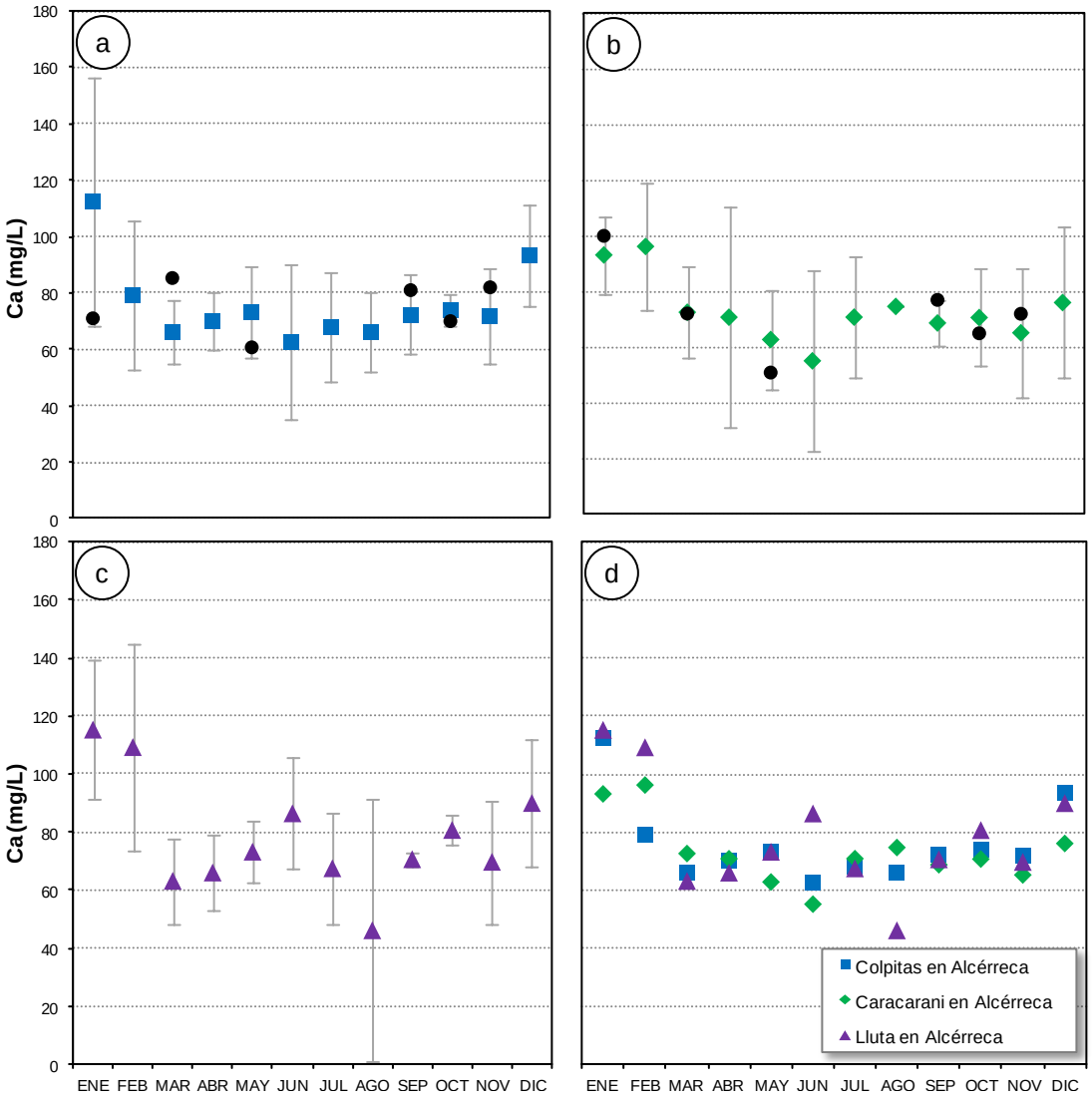
La Figura 4-10 y la Tabla 4-24 muestran que los valores de Boro varían entre punto y punto de monitoreo. La Figura 4-10 muestra el límite permitido por la norma NCh 1333Of.78 (INN, 1978) como una línea roja, y se observa que todos los valores están por sobre ella. A pesar que otros puntos de monitoreo tienen algunos valores por debajo de este límite, la mayoría de los puntos si lo supera. El valor más alto se presenta en el punto Termal con un promedio de 29,67 mg/L, y el valor más bajo se encuentra en el punto PM4 con 0,19 mg/L. La Figura 4-10 muestra que como consecuencia de la mezcla de aguas de PM5 y PM6, el río Lluta tienen valores promedios entre 5 a 15 mg/L.

Figura 4-10: Variación mensual de la concentración de Boro (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



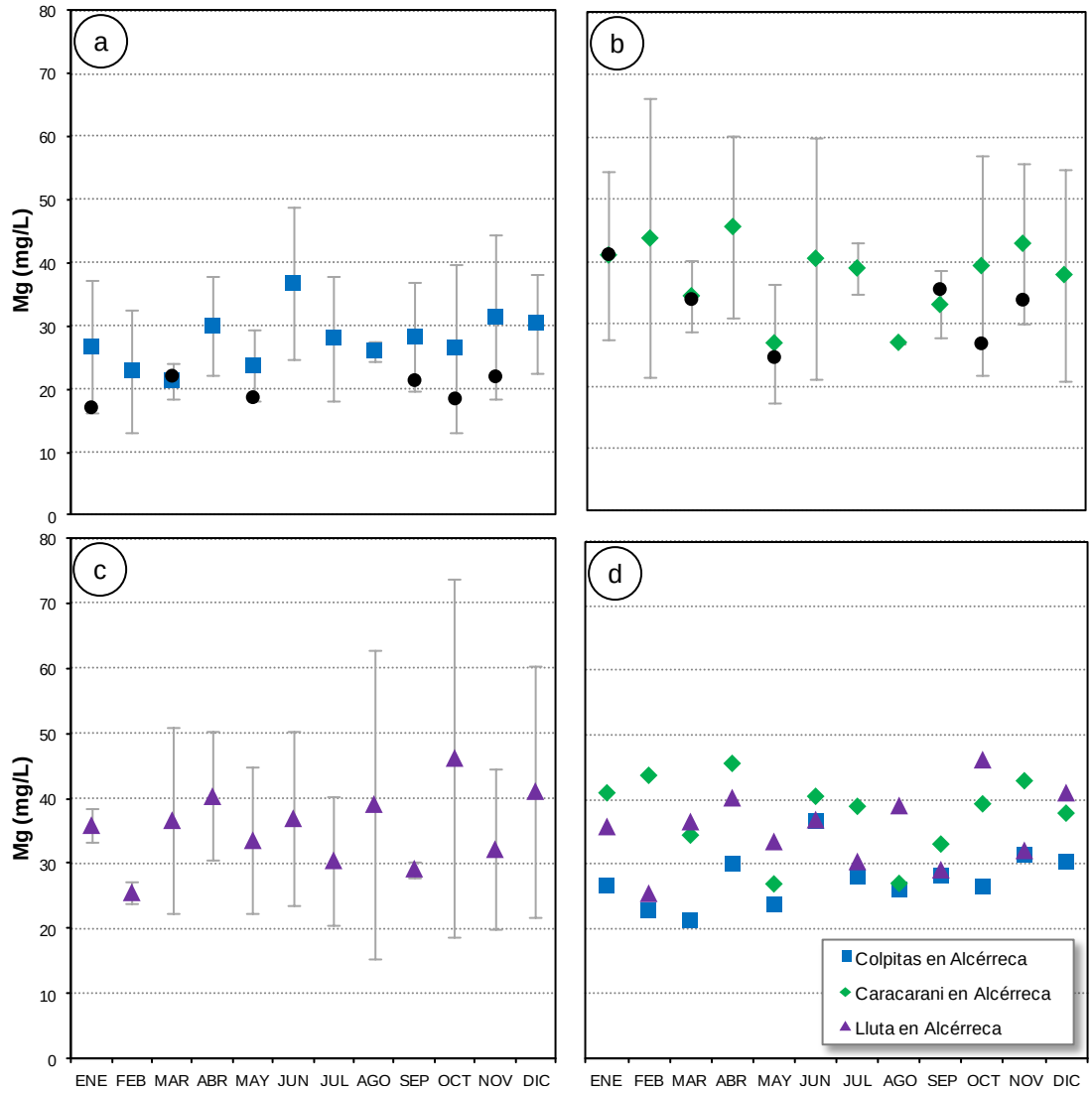
La Figura 4-11 y la Tabla 4-24 muestran que la variación de Calcio es alta entre los puntos de monitoreo, siendo el valor más alto el del punto Termal, con 175,33 mg/L y el de menos concentración el punto CP1 con 12,33 mg/L. La Figura 4-11 muestra que los valores promedios mensuales de PM5 se encuentran en el rango de 60 a 90 mg/L. Así mismo, PM6 mantiene un rango semejante, lo que se expresa en la calidad de agua del Lluta. En términos generales la concentración de Calcio es muy similar en cada uno de estos ríos.

Figura 4-11: Variación mensual de la concentración de Calcio (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



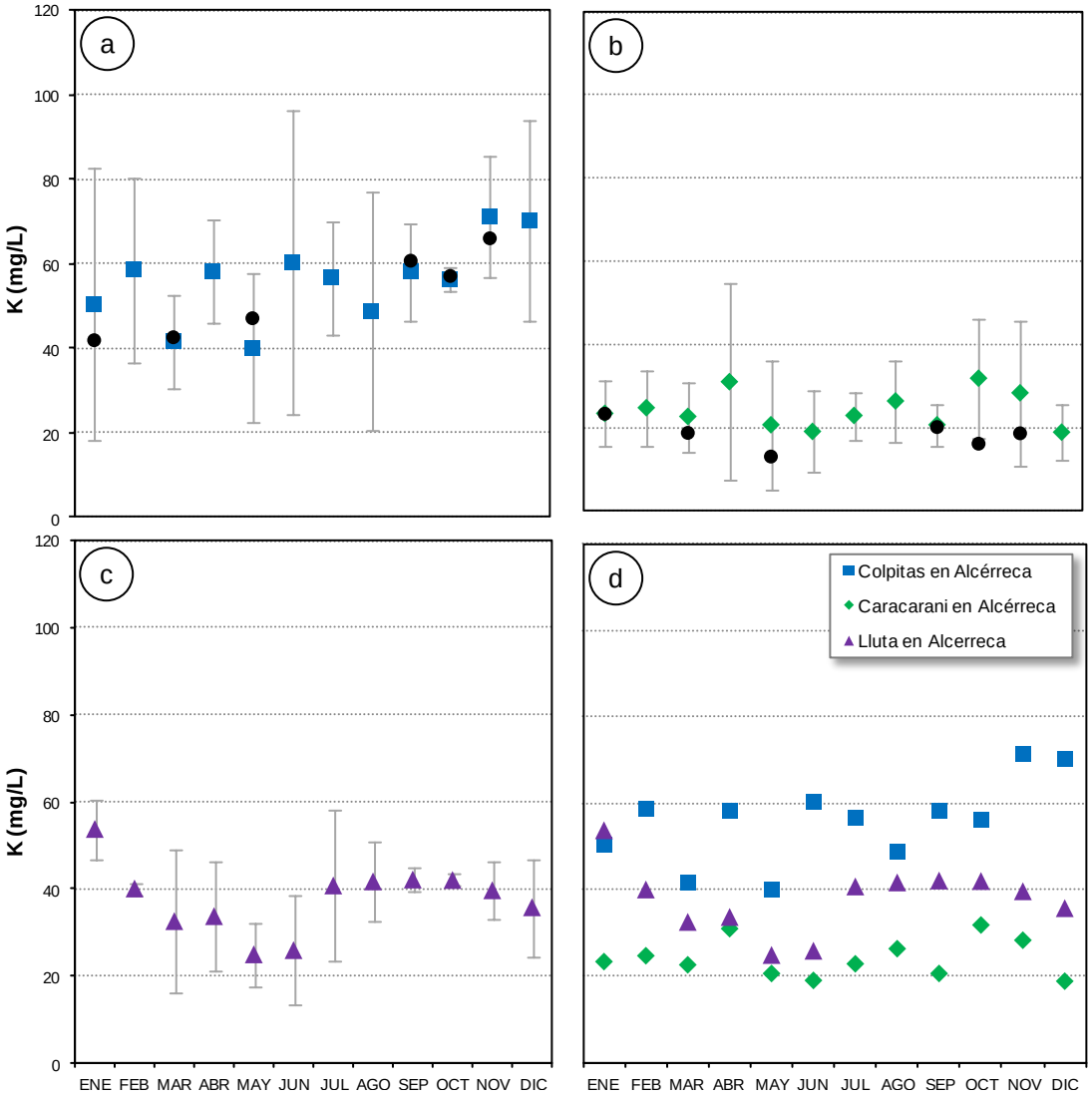
La Figura 4-12 y Tabla 4-24 muestra que la variación de la concentración de Magnesio no es tan alta; mientras que el punto de mayor concentración es PM5 con 27,84 mg/L, el punto de menor concentración es PM4 con 4,15 mg/L. Al igual que en Calcio, la Figura 4-12 muestra que la concentración de Magnesio es muy similar en cada uno de los puntos de monitoreo mostrados. La Tabla 4-24 muestra que el punto PM2 no presenta una alta concentración de Magnesio, como lo observado en las concentraciones de Boro, por lo que se deduce que en las borateras no existe una alta concentración de minerales asociados a este elemento.

Figura 4-12: Variación mensual de la concentración de Magnesio (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



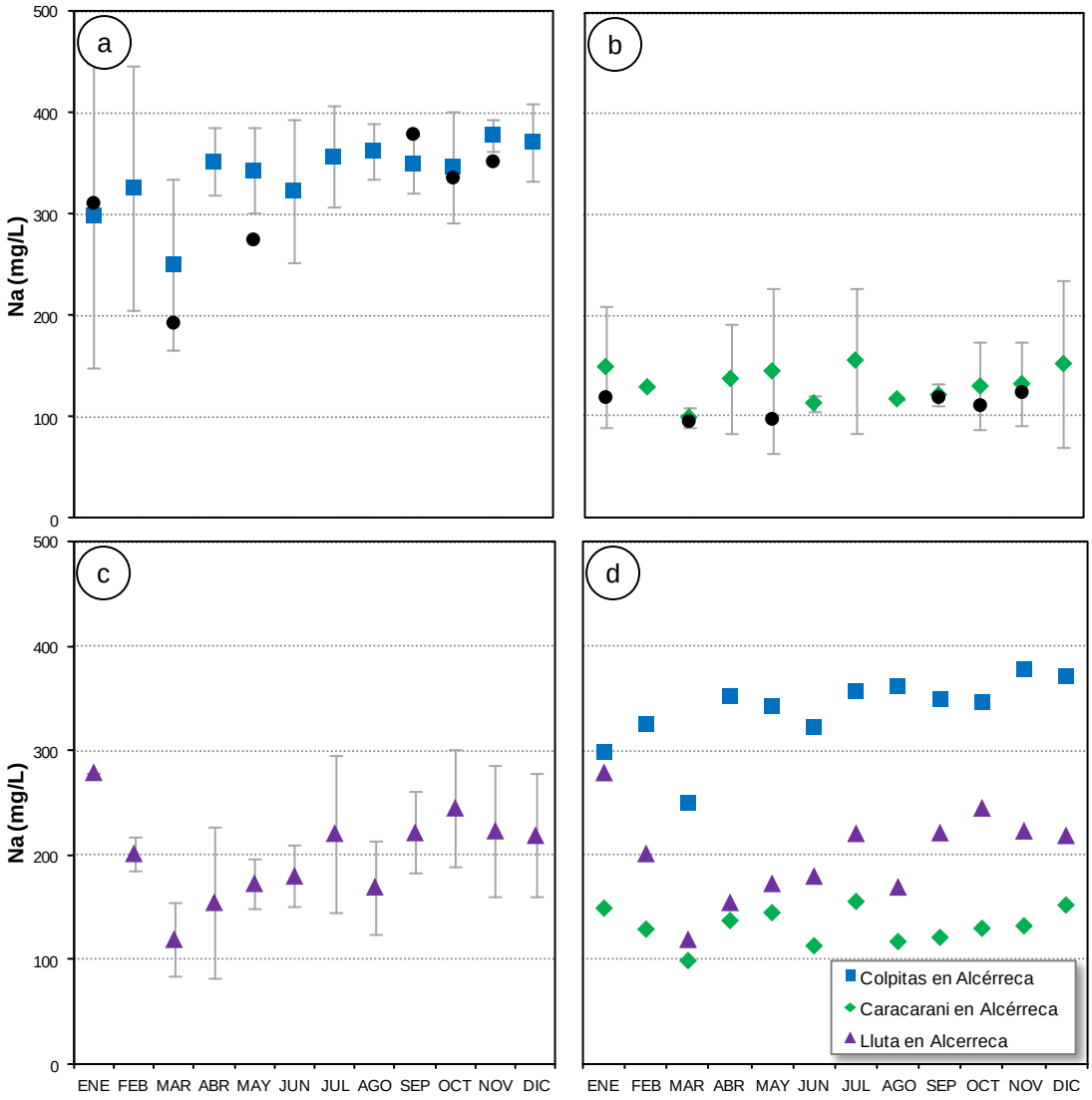
La Figura 4-13 y la Tabla 4-24 muestran que los valores de Potasio tienen una alta variabilidad de la concentración entre los puntos de monitoreo. El valor más alto de concentración se presenta en el punto Termal con 250,67 mg/L y el valor más bajo se presenta en el punto CP1 con 2,73 mg/L. La Figura 4-13 muestra que el valor promedio de Lluta en Alcérreca está entre medio de los valores promedio de los puntos PM5 y PM6, esto pues potasio es un ión conservativo y se debe a la mezcla de los ríos.

Figura 4-13: Variación mensual de la concentración de Potasio (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



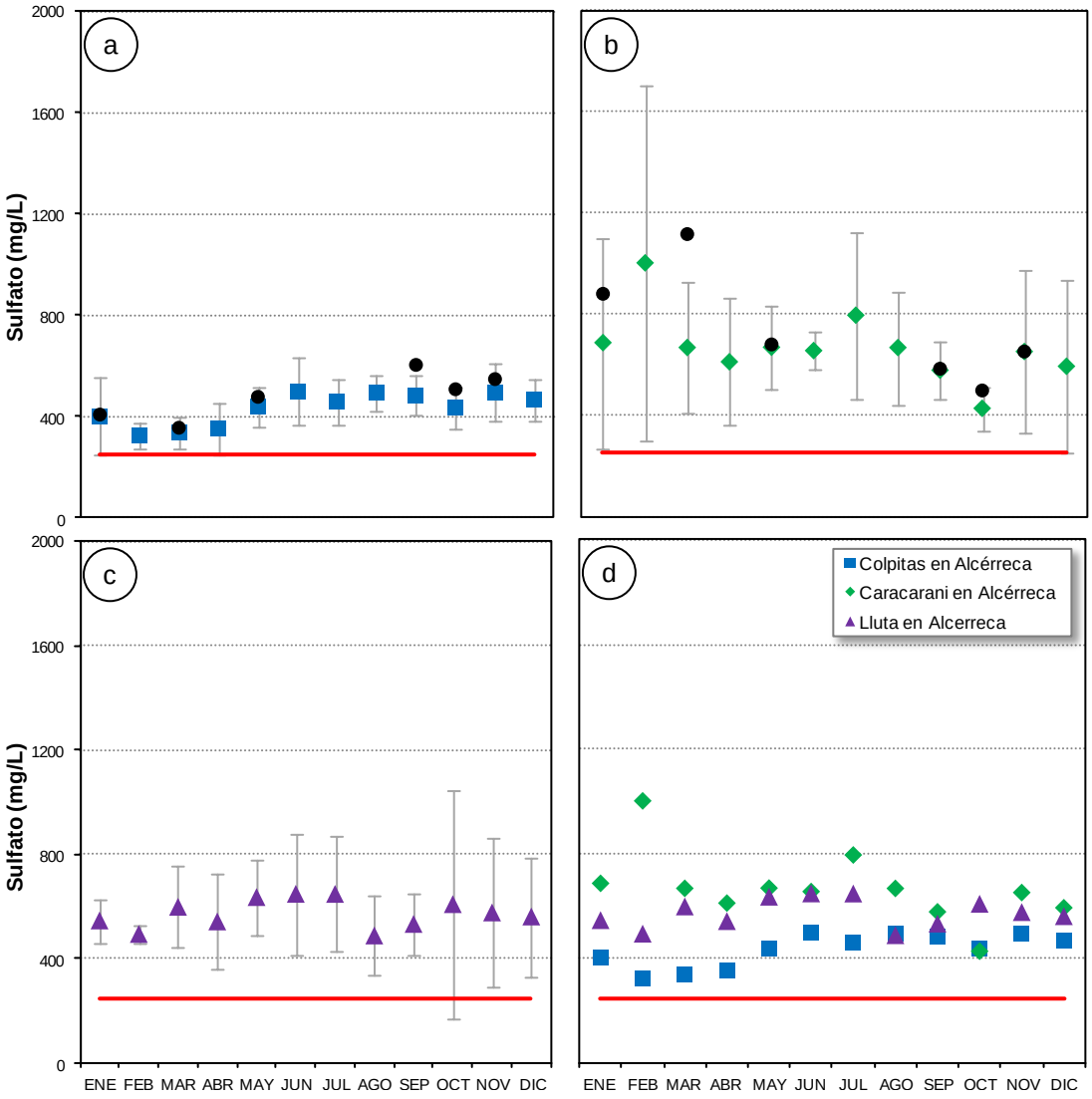
La Figura 4-14 y la Tabla 4-24 muestra que existe gran variación de la concentración de Sodio entre los puntos de monitoreo. El valor más alto de concentración se presenta en el punto Termal con 3.814,33 mg/L, y que el punto de menor concentración es el CP1 con 7,57 mg/L. Esto muestra que en las borateras existe una alta concentración de sales con alto contenido de Sodio. La Figura 4-14 muestra al igual que en Calcio, una mezcla conservativa de la concentración de sodio entre PM5 y PM6 para la concentración de Sodio de Lluta en Alcérreca.

Figura 4-14: Variación mensual de la concentración de Sodio (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



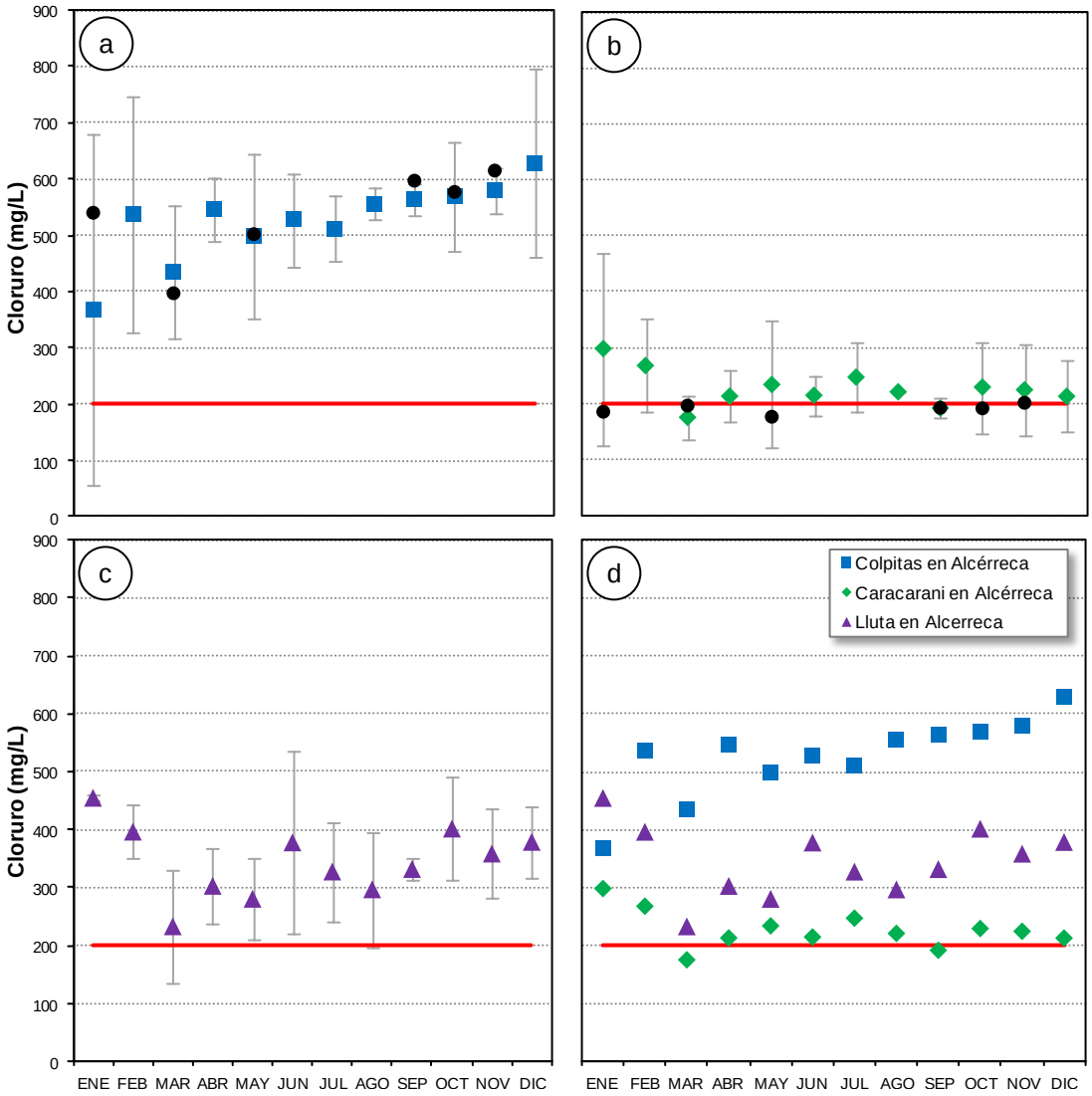
La Figura 4-15 y la Tabla 4-24 muestran que los valores de sulfato sufren una alta variación de su concentración entre los puntos de monitoreo. El valor más alto lo presenta el punto PM6 con 658,48 mg/L, y el valor más bajo lo presenta el punto Ca1 con 22,14 mg/L. La Figura 4-15 muestra que los valores del Lluta están entre los valores de Colpitas y Caracarani, haciendo del sulfato una especie conservativa. Tal como en otros iones, la variación del Lluta está directamente relacionada con la alta variación relativa del Caracarani.

Figura 4-15: Variación mensual de la concentración de sulfato (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



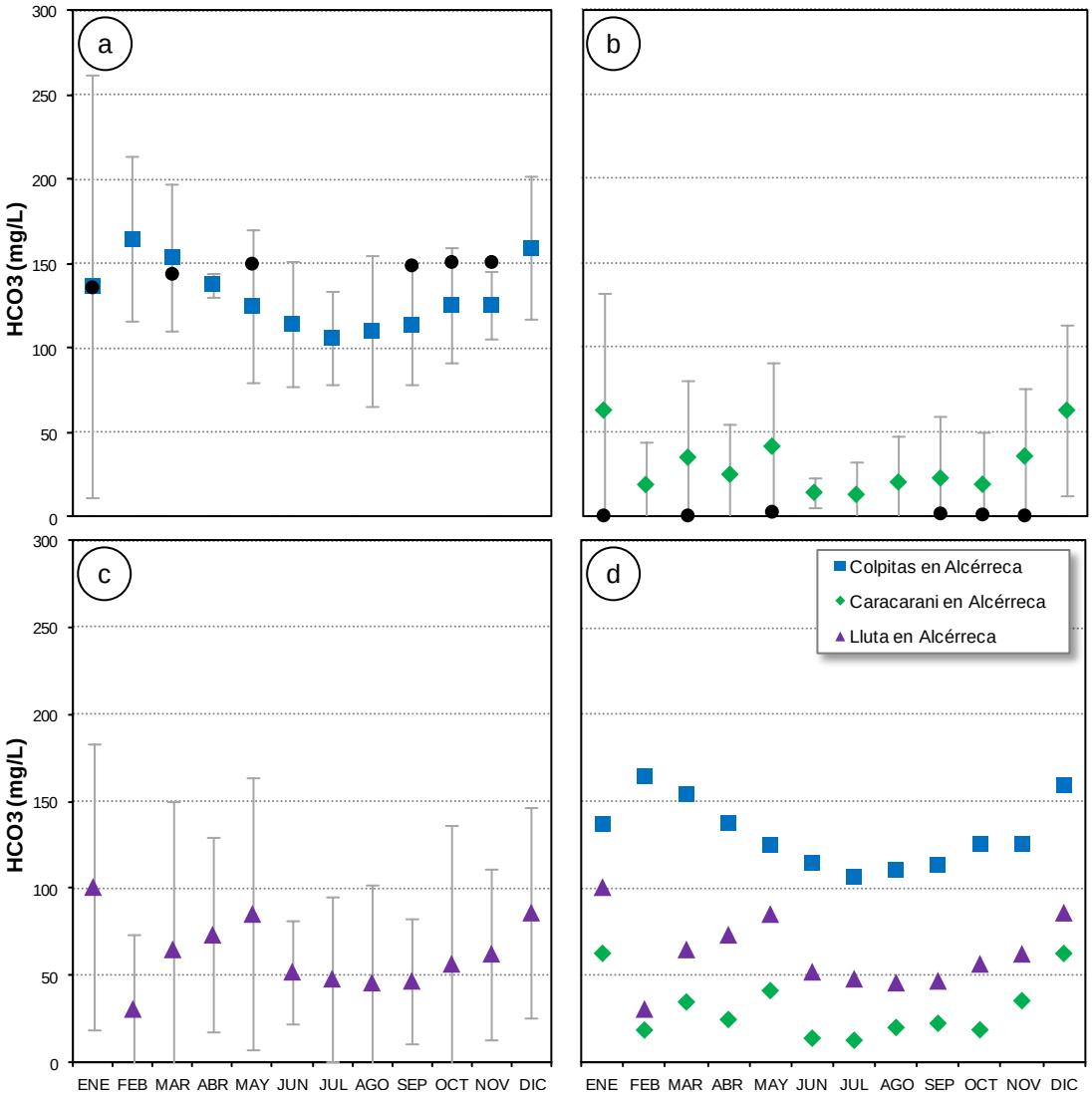
La Figura 4-16 y la Tabla 4-24 muestran que existe una alta variación de la concentración de cloruro entre los puntos de monitoreo. El valor más alto corresponde al punto Termal con 6.704,00 mg/L, y el valor más bajo, corresponde al punto PM4 con 1,82 mg/L. el valor más alto se explica por las sales de Halita presente en las borateras, y se traduce en aguas cloruradas sódicas en el cauce principal. La Figura 4-16 muestra que los valores en Colpitas son más del doble de lo presente en Caracarani. Este es un dato relevante que indica que la salinidad de las aguas de Colpitas tiene una gran influencia en el Lluta.

Figura 4-16: Variación mensual de la concentración de cloruro (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



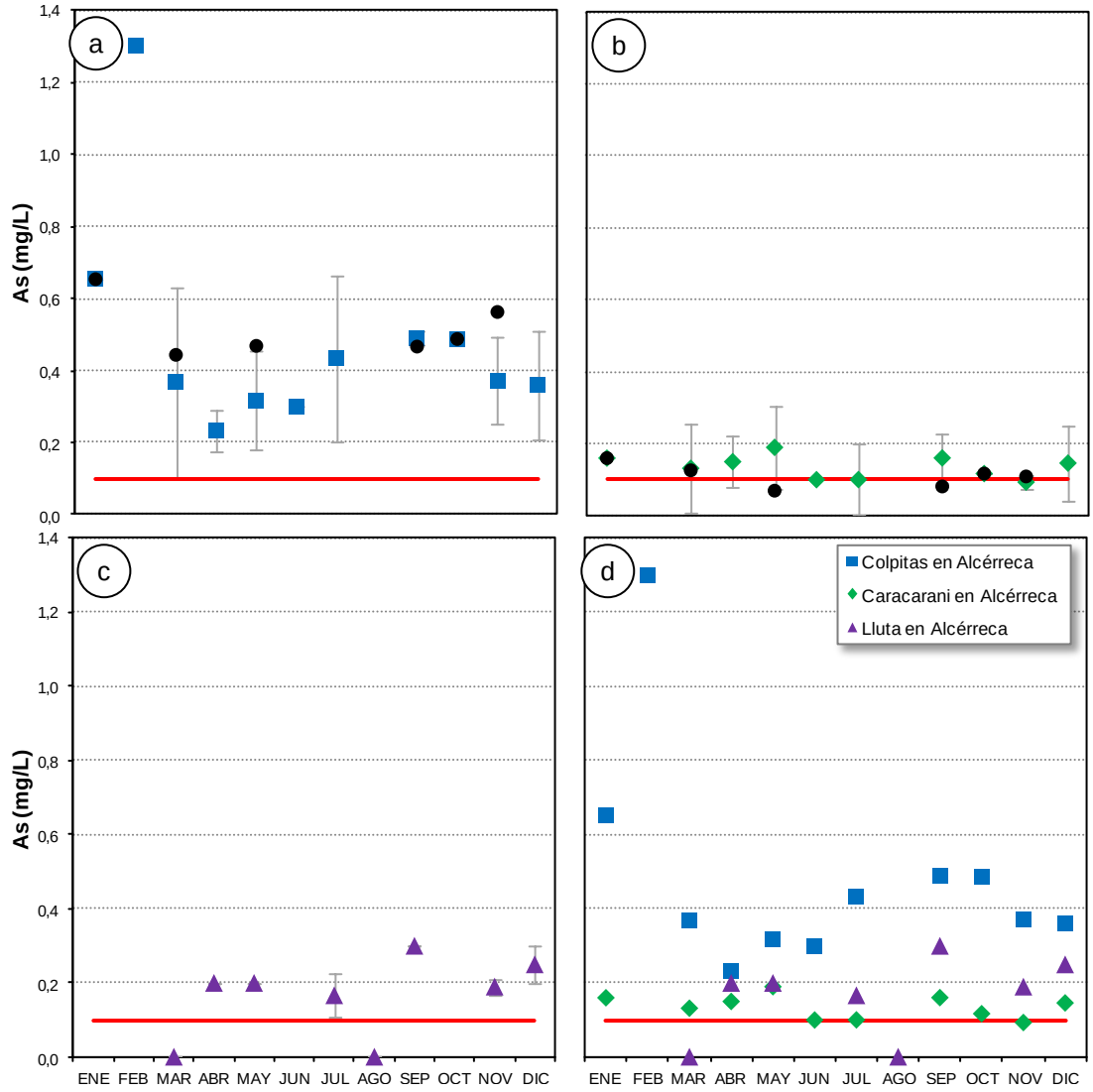
La Figura 4-17 y la Tabla 4-24 muestran que existe una alta variación del bicarbonato (y del carbonato) en los puntos de monitoreo. Esta especie es altamente sensible al pH, y a pesar de ser un componente típico de aguas termales, el pH de las mismas puede variar su concentración. La concentración mayor la presenta el punto Termal con 966,33 mg/L y la concentración menor es de 0,19 mg/L en el punto PM4. La Figura 4-17 muestra una alta influencia de los valores de Colpitas por sobre los valores del Lluta en cuanto a bicarbonato, pero hay que destacar que este elemento no es conservativo, por su dependencia del pH.

Figura 4-17: Variación mensual de la concentración de bicarbonato (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



La Figura 4-18 y la Tabla 4-24 muestran una alta variación de la concentración de Arsénico en los puntos de monitoreo. Se observa que el punto de mayor concentración es el Termal, con valores sobre los 8 mg/L, mientras que el punto con concentraciones menores es el CP1 con 0,008 mg/L. La Figura 4-18 muestra que en Colpitas, Alcérreca, y en Lluta, en casi todos los casos supera el límite máximo permitido por la NCh 1333Of.78 (INN, 1978) (línea roja en la Figura 4-18).

Figura 4-18: Variación mensual de la concentración de Arsénico (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



La Figura 4-19, Figura 4-20, y Tabla 4-24 muestran la variación de Cobre e Hierro en los puntos de monitoreo sobre la cuenca. Se observa que si bien en Cobre los valores máximos no son sobrepasados, en Hierro esto ocurre solo algunas veces (línea roja en las figuras).

Figura 4-19: Variación mensual de la concentración de Cobre (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.

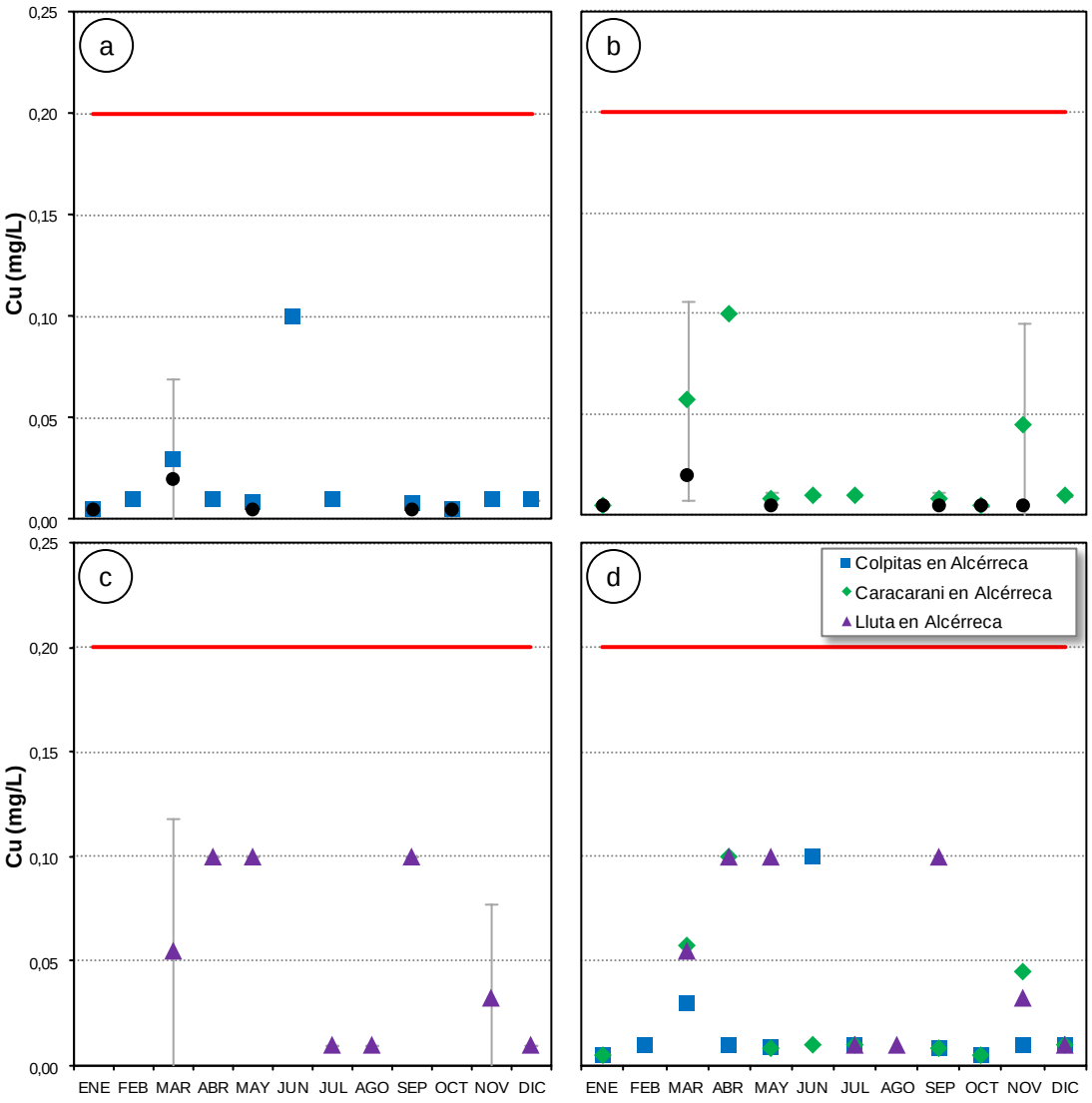
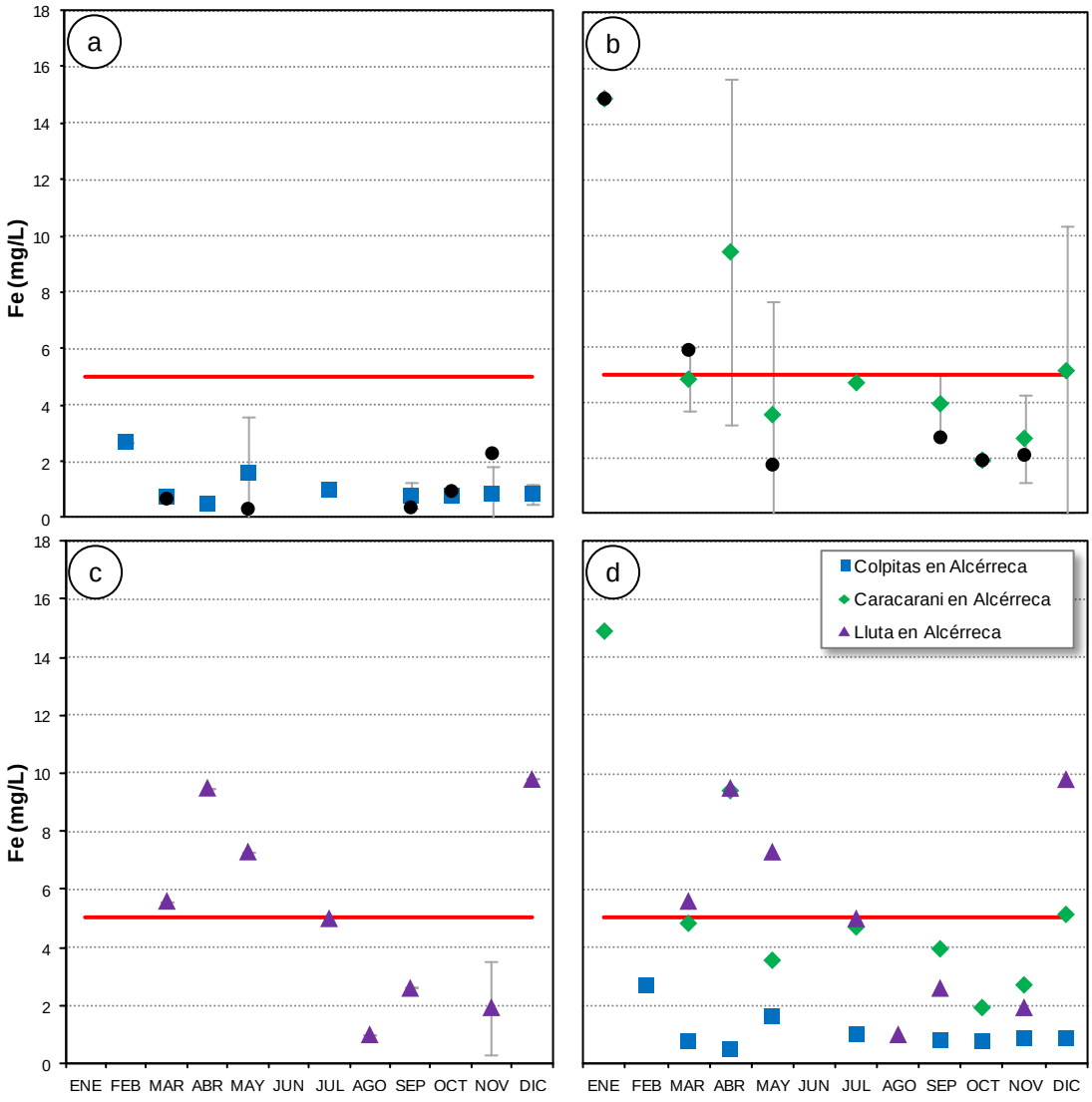


Figura 4-20: Variación mensual de la concentración de Hierro (mg/L) en a) PM5: Colpitas en Alcérreca, b) PM6: Caracarani en Alcérreca, c) Lluta en Alcérreca, y d) Resumen de los tres puntos. Los puntos negros en a) y b) representan las campañas realizadas por AMEC.



En conclusión a los resultados presentados, la calidad del agua esta muy influenciada por el sector de las borateras, como se hace notar en los puntos de monitoreo Termal y PM2. Otros puntos de monitoreo que no están en el cauce de las aguas de las borateras muestran una calidad química del agua distinta. Para PM2, los parametros hidroquimicos (aniones y cationes) se encuentran por sobre el valor promedio de la data debido a estar ubicado en el sector de las borateras, las cuales aportan mayor concentración de iones y en especial de Boro en rangos que van entre 50 y 70 mg/L. Ademas, el punto termal presenta valores 6 veces mayores que las concentraciones de

PM2 en parametros hidroquimicos (aniones y cationes) asociado a ser aguas geotermicas, las cuales aportan una gran cantidad de iones como cloruro, Sodio, Calcio, Potasio, bicarbonato, y en especial de Boro en rangos que rodean los 300 mg/L.

4.2 Calidad de Suelo y Sedimentos

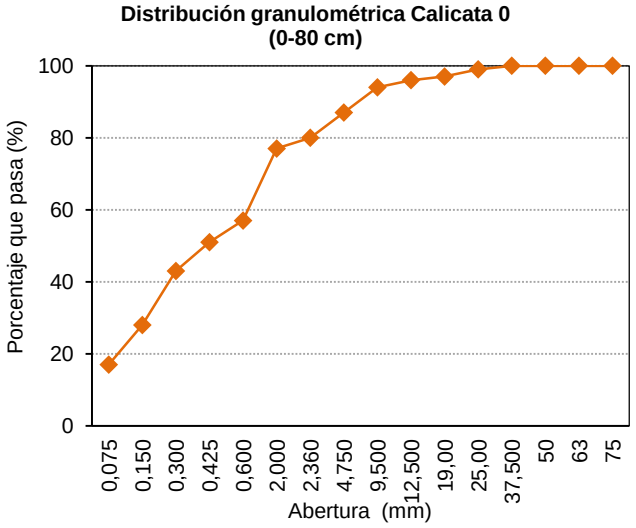
Los certificados de los análisis de los suelos y sedimentos se encuentran en el Anexo E, Sección 10.5.1.

4.2.1 Calidad de Suelos

4.2.1.1. Calicata C0:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C0 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0–20	Pardo (10YR 5/3) en húmedo y (10YR 4/3) en seco; arenosa; no plástico y no adhesivo; macizo, moderadamente firme. Poros muy finos abundantes. Presencia de abundante gravilla y gravas medias.
20–80	Pardo oscuro (10YR 3/3) húmedo, pardo pálido (10YR 6/3) en seco; arenosa; no plástico y no adhesivo, extremadamente firme. Poros muy finos abundantes. Presencia de Abundante gravilla.



Fuente: Elaboración propia

La pendiente del sitio aledaño a la calicata es del orden del 8 a 10 % y el suelo posee cobertura herbácea parcial, observándose indicadores de escurrimiento superficial, y

con ello arrastre de elementos superficiales hacia el cauce del río durante episodios de precipitaciones intensas.

La granulometría del suelo se concentra principalmente en fracción arenosa, siendo posible encontrar fragmentos pedregosos de hasta 20 mm de diámetro, aproximadamente.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 20 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-25.

Tabla 4-25: Características químicas del suelo superficial en C0.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	164	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	<0,10	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	38	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/cm	1	82	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	u.a.	0,1	6,3	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	458	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	<30	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

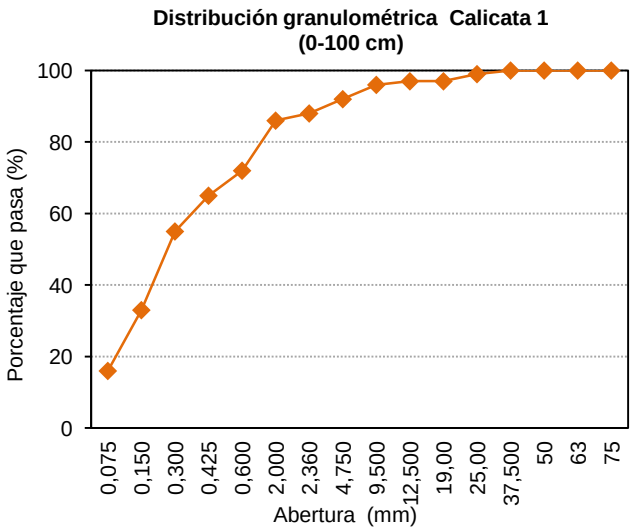
En este sector existe alta concentración de Arsénico, mientras que la concentración de Boro se encuentra por debajo del límite de detección.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 1 y Fotografía 2 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.2. Calicata C1:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C1 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0–40	Rojo pálido a pardo amarillento claro (10YR 6/3 a 6/4) en seco, y rojo débil (10YR 4/4) en húmedo; arenoso; no plástico y no adhesivo; macizo, ligeramente firme. Poros muy finos abundantes. Abundante gravilla
40–100	Pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo, arenoso, no plástico y no adhesivo. Suelto. Poros muy finos abundantes.



Fuente: Elaboración propia

El terreno, con una pendiente del orden de 1 a 2%, corresponde fundamentalmente a un depósito de sedimentos en combinación con material arrastrado desde las laderas de las montañas que configuran la caja en el sector.

Con respecto a la granulometría, aproximadamente el 70% se concentra dentro de la fracción arenosa.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 20 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestran en la Tabla 4-26.

Tabla 4-26: Características químicas del suelo superficial en C1.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	220	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	<0,10	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	33	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	145	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	7,0	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	349	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	<30	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

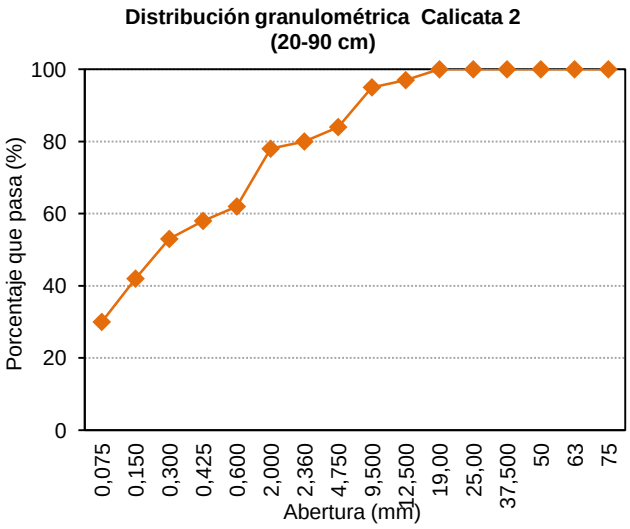
En este sector se observa alta concentración de Arsénico, mientras que la concentración de Boro se encuentra por debajo del límite de detección, encontrándose el resto de los parámetros en el rango tolerable.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 3 y Fotografía 4 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.3. Calicata C2:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C2 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0 – 20	Gris parduzco claro (10YR 6/2) en seco, pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; arenoso; no plástico y no adhesivo; estructura de bloques subangulares débiles, ligeramente a moderadamente firme. Poros muy finos abundantes.
20 – 90	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo. Arenosa con abundante gravilla, macizo, moderadamente firme. Poros muy finos abundantes.



Fuente: Elaboración propia

El sector en que se realizó la calicata corresponde a un terreno de topografía ondulada formado por la depositación de material proveniente de las montañas aledañas a la Quebrada Allane.

Con respecto a la granulometría representativa del perfil, cerca del 50% se concentra en la fracción arenosa, mientras que cerca del 30% corresponden a elementos finos (limo y arcilla).

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 20 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-27.

Tabla 4-27: Características químicas del suelo superficial en C2.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	14.0	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	14,6	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	4.257	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	12.075	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	6,1	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	3.195	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	287	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

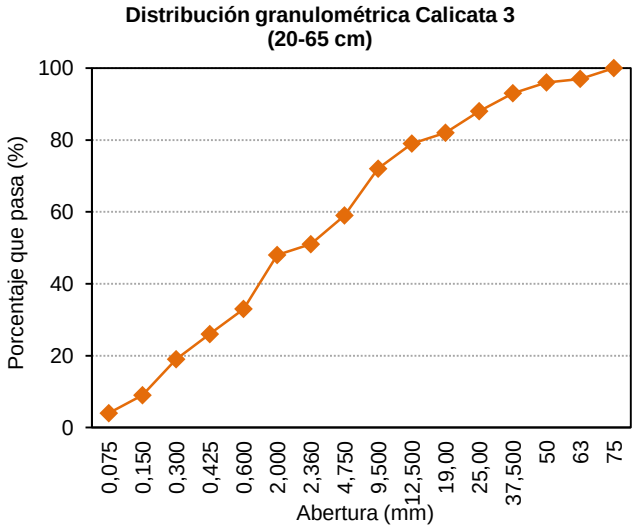
En estos suelos el Boro sobrepasa límites tolerables, lo que sucede además con cloruros, conductividad eléctrica, y Sodio.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 5 y Fotografía 6 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.4. Calicata C3:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C3 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0 – 20	Colores variegados con dominio de gris parduzco claro (10YR 6/2) en seco y pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; arenosa; no plástico y adhesivo con abundante gravilla. Poros muy finos abundantes.
20 – 65	Colores variegados con dominio de pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo. Sustrato pedregoso en matriz arenosa, suelto. Poros muy finos abundantes; saturado a los 65 cm.



Fuente: Elaboración propia

El terreno en que se realizó la calicata corresponde a un piedmont en la Cuenca de la Quebrada Colpitas, de topografía ligeramente inclinada en la base e inclinada a escarpada hacia la ladera que lo origina.

La granulometría se compone principalmente de fragmentos gruesos, 50% aproximadamente, en matriz arenosa.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 20 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-28.

Tabla 4-28: Características químicas del suelo superficial en C3.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de Referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	425	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	60,8	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	30	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	570	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	8,7	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	1.812	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	<30	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

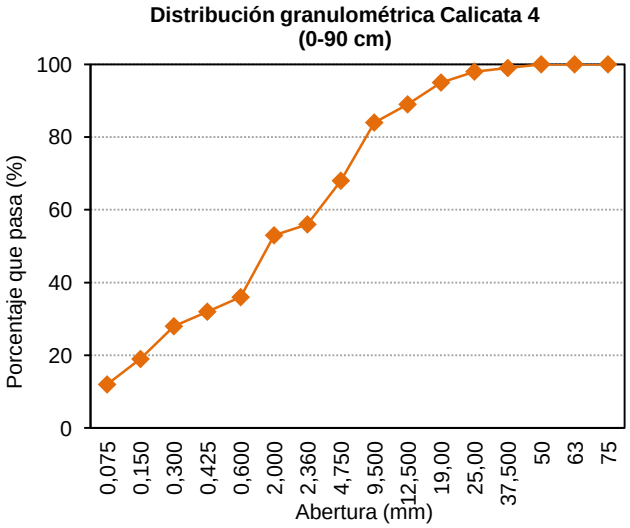
En estos suelos se determinó alta concentración de Arsénico, Boro, y Sodio; mientras que el pH incrementa su alcalinidad por sobre el rango severo de referencia.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 7 y Fotografía 8 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.5. Calicata C4:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C4 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0 – 20	Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; arenosa; no plástico y no adhesivo; macizo, ligeramente firme. Poros muy finos abundantes.
20 – 70	Prado grisáceo oscuro (2,5Y 4/2) en húmedo; arenosa, no plástico y no adhesivo; macizo, ligeramente firme. Poros muy finos abundantes.
70 - 90	Gris (10YR 5/1) en húmedo; arenosa, no plástico y no adhesivo; suelto. Poros muy finos abundantes.



Fuente: Elaboración propia

El suelo corresponde a material no consolidad conformado por la depositación de material arrastrado por el lecho de la quebrada a lo que se suma el material proveniente de la ladera sur de los cerros que conforman la topografía de la caja.

La granulometría se compone por un 50% de elementos gruesos, fragmentos de hasta 40 mm, en matriz arenosa.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 21 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-29.

Tabla 4-29: Características químicas del suelo superficial en C4.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	27,0	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	28,2	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	33	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	795	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	9,2	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	2.624	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	<30	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

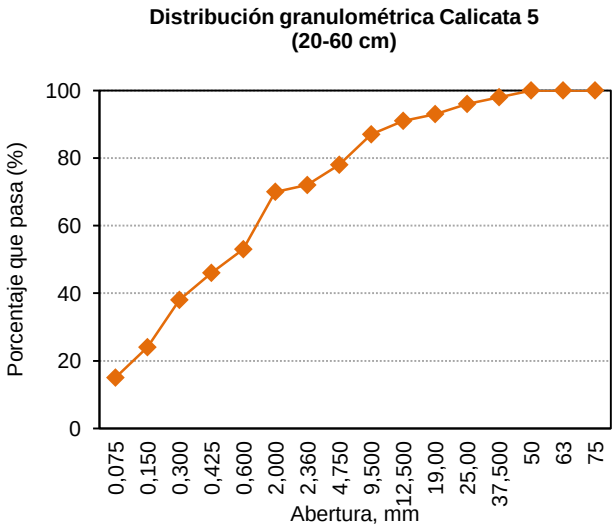
En el punto analizado, el contenido de Sodio y Boro en el suelo superan límite superior de tolerancia, así como el pH supera el límite de alcalinidad.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 9 y Fotografía 10 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.6. Calicata C5:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C5 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0 – 20	Dominio de pardo (10YR 4/3) en húmedo; arenosa media a fina; no plástico y no adhesivo; presencia de materia orgánica y abundantes raíces. Poros muy finos abundantes.
20 – 40	Gris oscuro (10YR 4/1) en húmedo; arenoso con abundante gravilla y gravas; no plástico y no adhesivo; suelto. Poros muy finos abundantes.
40 – 60	Gris muy oscuro a gris oscuro (10YR 3/1 a 4/1) en húmedo; arenosa con presencia de gravas redondeadas; no plástico y no adhesivo, suelto. Poros muy finos abundantes.



Fuente: Elaboración propia.

El suelo está formado por material depositado por la quebrada aportante a la Quebrada Colpitas, y cuya pendiente es del orden del 5%.

La granulometría se compone principalmente de arena con escasos fragmentos de hasta 40 mm.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 20 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-30.

Tabla 4-30: Características químicas del suelo superficial en C5.

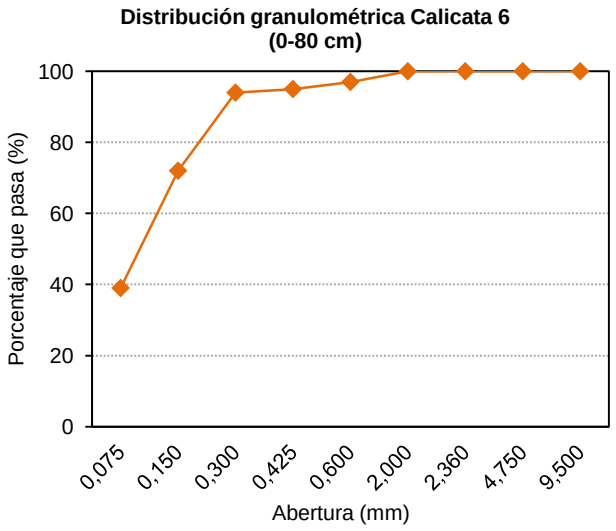
Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	12,7	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	3,72	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	18	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	590	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	7,8	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	367	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	138	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

En estos suelos se observa que el Boro supera ligeramente el límite severo de concentración; mientras que el resto de los elementos se encuentra en un nivel adecuado dentro del rango de referencia.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 11 y Fotografía 12 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.7. Calicata C6:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C6 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción	
0 – 80	Pardo (10YR 4/3) en húmedo; limo arenosa muy fina; macizo; ligeramente firme; no plástico y no adhesivo. Poros muy finos abundantes.	
80 – 90	Gris verduzco muy oscuro (Gley 1 3/10GY) en húmedo; corresponde a una paleovega por lo que está compuesta de abundante presencia de materia orgánica descompuesta en matriz limosa, moderadamente plástica y adhesiva. Poros muy finos escasos, saturados.	

Fuente: Elaboración propia

El suelo está formado por arenas finas y limo depositado por la Quebrada Colpitas y cuya pendiente es del orden de 1 a 2%. Se caracteriza por la presencia de vega.

El 60% de las partículas de suelo se constituye por arenas finas, principalmente, mientras que el 40% se compone de elementos finos.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 20 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-31.

Tabla 4-31: Características químicas del suelo superficial en C6.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	637	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	115	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	242	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	2.710	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	8,2	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	1.372	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	229	-	-
T° de medición pH	°C	0	22	-	-

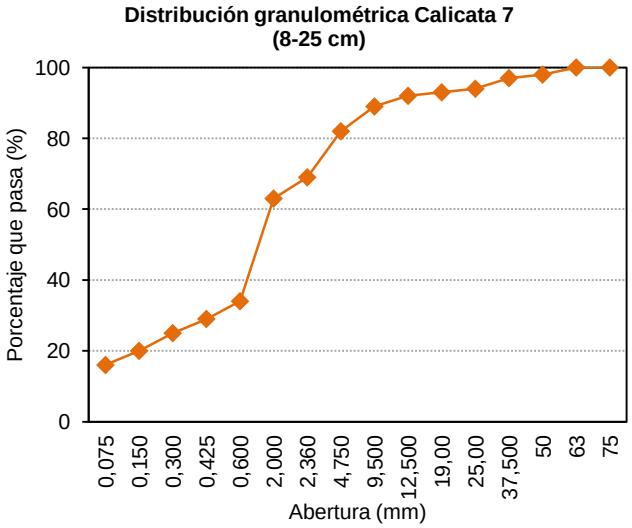
El punto de referencia muestra que el suelo presenta concentración de Arsénico, Boro y Sodio por sobre los niveles máximos de tolerancia, valores que en el caso de Arsénico es extremadamente alto.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 13 y Fotografía 14 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.8. Calicata C7:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C7 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0 – 8	Blanco (2,5Y 8/1) en húmedo; arenosa; estructura subangular, moderada; ligera a moderadamente firme; no plástico y no adhesivo. Poros muy finos abundantes. Se observa excesiva presencia de sales.
8 – 25	Pardo (10YR 5/3) en húmedo; arenosa; macizo; moderadamente firme; no plástico y no adhesivo. Poros muy finos abundantes.
25 y más	Substrato extremadamente firme.



Fuente: Elaboración propia

Se trata de un suelo muy delgado que forma parte del lecho depositado por arrastre de material el que posee abundante presencia de sales en el horizonte superficial pero que a la vista disminuye en profundidad. A partir de los 25 cm, suelo extremadamente firme que no permite continuar con la excavación. Carece de vegetación.

La granulometría está conformada por un 40% de arena, la que contiene elementos gruesos de hasta 60 mm, abundantes.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 8 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-32.

Tabla 4-32: Características químicas del suelo superficial en C7.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	1.595	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	>1.000	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	8.588	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	27.775	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	8,6	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	22.672	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	260	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

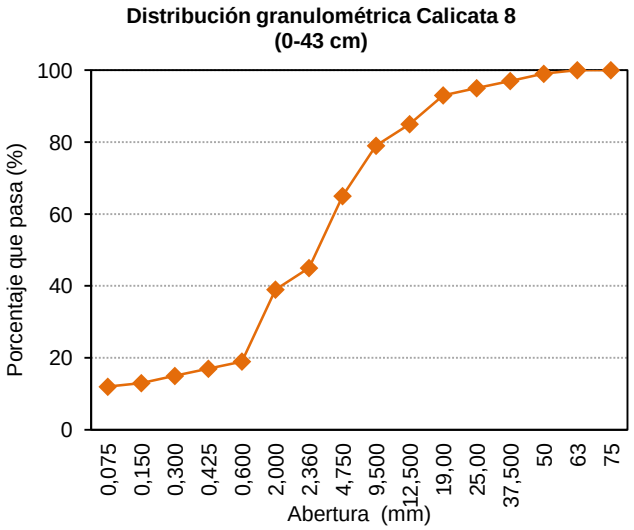
En estos terrenos, representativos de la depositación de suelo en el área de la boratera, con excepción del pH los parámetros relevantes presentan concentración extremadamente alta.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 15 y Fotografía 16 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.9. Calicata C8:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C8 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0 – 6	Colores variegados con dominio de pardo amarillento (10YR 5/8) en húmedo; arenosa; no plástico y no adhesivo; estructura de bloques subangulares, moderados. Poros muy finos abundantes. Gravilla abundante y sales abundantes.
6 – 43	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; arenosa; no plástico y no adhesivo; macizo moderada a ligeramente firme en profundidad. Poros muy finos abundantes. Abundante gravilla.
43 y más	Substrato a extremadamente firme.



Fuente: Elaboración propia

Suelo delgado de carácter aluvial con abundantes sales en el horizonte superficial debido al afloramiento de aguas termales, las que disminuyen en profundidad. A partir de los 43 cm, substrato extremadamente firme que impide la excavación. Carece de vegetación.

La granulometría está conformada por un 40% de arena, la que contiene elementos gruesos de hasta 60 mm, abundantes.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 6 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-33.

Tabla 4-33: Características químicas del suelo superficial en C8.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	5.748	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	>1.000	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	1.495	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	9.525	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	8,8	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	27.980	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	489	-	-
T° de medición pH	°C	0	22	-	-

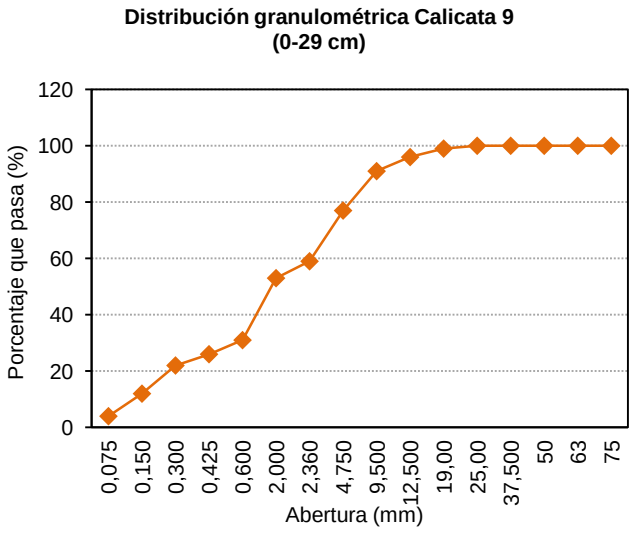
Similar a la condición del punto C7, estos terrenos son representativos de la depositación de suelo en el área de la boratera y con excepción del pH, los parámetros relevantes presentan concentración extremadamente alta.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 17 y Fotografía 18 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.10. Calicata C9:

Características de Perfil y Granulometría: La calicata C9 presenta el perfil que se describe a continuación, donde se indica además la distribución granulométrica dominante:

Profundidad (cm)	Descripción
0 – 29	Colores variegados con domino de pardo oliva (2,5Y 4/3) en húmedo. Gravoso en matriz arenosa; suelto, poros muy finos abundantes.
29 – 80	Negro (Gley1 2,5/N) en húmedo; limo arenosa fina. El horizonte corresponde a una paleovega por lo que está compuesto de abundante materia orgánica altamente descompuesta. Moderadamente plástica y adhesiva. Poros muy finos escasos, saturados.



Fuente: Elaboración propia

Suelo depositado por arrastre aluvial y que forma parte del lecho de la quebrada, con pendiente del orden de 2% y que sustenta vegetación de tipo bofedal irrigada por el río Colpitas.

Características Químicas: La muestra de suelo se colectó en el rango de 0 a 20 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-34.

Tabla 4-34: Características químicas del suelo superficial en C9.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	80,9	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	<0,10	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	<10	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	539	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	7,5	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	310	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	205	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

Este punto ubicado aguas arriba de la boratera no presenta el suficiente contenido de Boro para ser detectado; sin embargo destaca su contenido de Sodio y Arsénico.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 19 y Fotografía 20 del Anexo E, Sección 10.5.2.

4.2.1.11. Calicata C10:

Características de Perfil y Granulometría: El punto descrito corresponde a una calicata existente en la cual se realizó una ligera inspección del perfil, puesto que se presentó al interior de ésta olor a compuestos azufrados.

Profundidad (cm)	Descripción
0 – 200 y más	Blanco (2,5 YR 8/1). Corresponde a un sustrato rocoso compuesto por ignimbrita.

Fuente: Elaboración propia

Características Químicas: La muestra de material se colectó en una calicata existente, en el rango de 0 a 20 cm, cuya concentración de elementos de interés se muestra en la Tabla 4-35.

Tabla 4-35: Características químicas del suelo superficial en C10.

Parámetro	Unidad	Límite de Detección	Concentración	Concentración de referencia	
				Sin problema	Severo
Arsénico	mg/kg	0,01	39,3	<15	>50
Boro	mg/kg	0,1	87,8	<0,75	>3,0
Cloruro	mg/kg	10	12	<350	>350
Conductividad a 25 °C	uS/Cm	1	53.325	<2.000	>4.000
pH 25°C Laboratorio	UpH	0,1	1,7	6,5–8,0	>8,5
Sodio	mg/kg	0,1	364	<115	>700
Sulfato	mg/kg	30	17.025	-	-
T° de medición pH	°C	0	23	-	-

La muestra analizada para este punto supera parámetros correspondientes a conductividad eléctrica y Boro principalmente, destacándose además alto contenido de sulfato.

Imágenes de referencia de la calicata y su entorno corresponden a la Fotografía 21 y Fotografía 22 del Anexo E, Sección 10.5.2.

La Figura 4-21 muestra el resumen de los parámetros que superaron el estándar de referencia en las calicatas estudiadas.

Calicata	Este	Norte
Calicata 0	433074	8010608
Calicata 1	433496	8010176
Calicata 2	451447	8011866
Calicata 3	450973	8012761
Calicata 4	452688	8013644
Calicata 5	451574	8014746
Calicata 6	452219	8014341
Calicata 7	455201	8014649
Calicata 8	454462	8015246
Calicata 9	456432	8015723
Calicata 10	455415	8014818

COMUNA DE GENERAL LAGOS

COMUNA DE PUTRE

Calicata 0

As= 164 mg/Kg

Calicata 1

As= 220 mg/Kg

Calicata 2

B = 14,6 mg/Kg
Cl^-= 4.257 mg/Kg
Ce= 12.075 µS/cm
Na= 3.195 mg/Kg

Calicata 3

As= 425 mg/Kg
B = 60,8 mg/Kg
Na= 1.812 mg/Kg

Calicata 4

B = 28,2 mg/Kg
Na= 2.624 mg/Kg

Calicata 6

As= 637 mg/Kg
B = 115 mg/Kg
Na= 1.372 mg/Kg

Calicata 7

As= 1.595 mg/Kg
B = >1.000 mg/Kg
Cl^-= 8.588 mg/Kg
Ce= 27.775 µS/cm
Na= 22.672 mg/Kg

Calicata 8

As= 5.748 mg/Kg
B = >1.000 mg/Kg
Cl^-= 1.495 mg/Kg
Ce= 9.525 µS/cm
Na= 27.980 mg/Kg

Calicata 9

As= 80,9 mg/Kg

Calicata 10

B = 87,8 mg/Kg
Ce= 53.325 µS/cm
pH=1,7
SO_4^{2-}= 17.025 mg/Kg

435000 440000 445000 450000 455000

8025000 8020000 8015000 8010000 8005000

Leyenda

- Calicata
- Río
- Quebrada
- Bofedales
- Borateras
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal

TITULO

Compuestos que Superan Límites de Referencia

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1:100.000	2 1 0 2 Km	4-21

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-21.mxd

Los suelos aledaños al cauce del río Colpitas y sus quebradas aportantes son de carácter incipientes, dominados por texturas gruesas y escasamente consolidados. Prácticamente no poseen valor productivo a excepción de las zonas de bofedales en los que se sustenta la alimentación de camélidos y la vida silvestre local.

En cuanto a la composición química, los suelos del cauce del río Colpitas existen elementos químicos que superan ampliamente concentraciones de referencia para cultivos. Esta situación es recurrente en parámetros como Arsénico, Boro, y Sodio los que incrementan exponencialmente su concentración en el sector de la boratera, a lo que se suma alta salinidad; mientras que aguas abajo se observa tendencia a rangos tolerables.

El Arsénico si bien tiene un comportamiento variable, posee altas concentraciones en los puntos directamente asociados al cauce del río Colpitas.

Más arriba de la boratera, los parámetros de suelo tienden a comportarse dentro del rango normal, situación que permite sobrevivencia de la vegetación azonal hídrica del cauce en buenas condiciones, como también la presencia de afloramientos salinos en la superficie es prácticamente nula.

4.2.2 Calidad de Sedimentos

Los sedimentos muestreados fueron analizados bajo los mismos parámetros de la calidad del suelo debido a la falta de normativa que regule la calidad de los mismos. La Tabla 4-36 muestra los resultados de la calidad del sedimento.

Tabla 4-36: Resultados de calidad de sedimento.

Parámetro	Unidad	Limite de Detección	PM1	PM2	PM3	PM5	Concentración de referencia	
			30/05/13	30/05/13	30/05/13	30/05/13	Sin problema	Severo
Aluminio	mg/kg	0,5	1.058	1.062	1.334	1.329		
Arsénico	mg/kg	0,1	13,0	184	6,82	110	<15	>50
Azufre	mg/kg	10	<10	21	<10	23		
Boro	mg/kg	0,1	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,75	>3,0
Calcio	mg/kg	0,1	1.175	2.076	2.022	1.100		
Cloruro	mg/kg	10	16	263	35	180	<350	>350
Hierro	mg/kg	0,1	6.260	3.538	7.358	4.266		
Manganeso	mg/kg	0,1	185	157	148	256		
Plomo	mg/kg	0,1	4,00	2,32	2,14	4,92		
Silicio	mg/kg	0,1	14,4	21,0	17,3	29,0		
Sodio	mg/kg	0,1	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<115	>700

Se observa que si bien, muchos suelos tienen altos contenidos de Boro, los sedimentos (lecho del río), presentan concentraciones bajo el límite de detección. Esto debido a la movilidad del Boro, y por ende al constante lavado que sufren los sedimentos, éste solo se deposita en el suelo seco y que no tiene flujo. Esta misma situación se observa con el Sodio y en parte con los cloruros; el sodio también muestra valores por debajo del límite de detección, lo que evidencia un lavado, y si bien el cloruro muestra valores por sobre el límite de detección, éstos corresponden a menos de lo considero problemático, lo que evidencia también el lavado de los sedimentos del río.

Descripción aparte merece la cantidad de Arsénico en el sedimento, ya que en los valores se observa que el Arsénico queda retenido en el sedimento. El punto PM1, que se encuentra antes de las borateras, tiene una concentración de Arsénico definida como sin problema, sin embargo, aguas abajo de las borateras (punto PM2) se observa un considerable aumento de la concentración que se considera como severo. Esta concentración severa se mantiene hasta el punto PM5. En cambio el punto PM3, afluente con aguas de buena calidad, presenta concentraciones de Arsénico consideradas sin problema.

4.2.3 Caracterización Agronómica

La actividad agrícola en la Región de Arica y Parinacota se desarrolla en pequeñas quebradas y valles costeros; entre estos últimos se destaca la actividad agrícola en los Valles de Lluta (18º 25’ de Latitud Sur y 70º 20’ de Longitud Oeste) y de Azapa (18º 35’ Latitud Sur y 60º 30’ Longitud Oeste) (Torres, 2008).

Estos valles tienen condiciones climáticas similares, pero niveles de producción y diversidad de cultivos muy diferentes (Torres & Acevedo, 2008).

4.2.3.1. Descripción del Sistema Agrícola del Valle del río Lluta

Según estudio de CADE-IDEPE (2004), la agricultura del Valle del Lluta estaba caracterizada por una superficie total agrícola de la cuenca valle del bajo Lluta de 7.606 ha Esta área se ubica a lo largo de un tramo de 65 km entre Vilacollo y la desembocadura del río. Estas tierras agrícolas son abastecidas por el sistema de irrigación del río Lluta. Sin embargo, el área cultivada se limita normalmente a 2.784 ha que corresponden al 37% del total de tierras agrícolas. La superficie restante está en permanente descanso debido a la carencia de agua de riego y a la escasa capacidad de drenaje del suelo. Debido a la contaminación de origen natural con Boro del río Lluta, los tipos de cultivo en el Valle del Bajo Lluta, según superficie cultivada, corresponden al maíz (1.698 ha), la alfalfa (684 ha) y cierto tipo de verduras (402 ha).

Según datos del Censo Agropecuario 2007, los principales cultivos son: hortalizas con el 46,4% de la superficie total cultivada de la región, frutales con 27,4% y plantas

forrajeras con 23,6%. A nivel de hortalizas, el principal producto es el tomate, que en los últimos diez años ha registrado un aumento de un 89% en la superficie cultivada. En frutales, el producto principal es olivo, que representa el 74,6% de la superficie regional cultivada y el 14,1% de la superficie nacional (FIA, 2009).

De acuerdo a esto, la región contaba con una superficie total de 2.877 ha cultivadas con hortalizas, desglosadas en 2.854 ha al aire libre y 24 ha bajo invernadero. El tomate para consumo fresco supera las 840 ha; le sigue el poroto verde y pimiento con 171 y 138 ha, respectivamente.

Luego, en el censo agropecuario del 2010, los rendimientos medios superaron significativamente las medias nacionales, alcanzando medias de 113 t/ha en tomate; 46,5 t/ha en pimiento y, 9,8 t/ha en poroto verde respecto a la media nacional de 71, 37 y 8,4 t/ha, respectivamente. Otras hortalizas de importancia económica son el choclo, con 958 ha, seguida por la cebolla que suma un total de 342 ha, considerando la cebolla temprana (264 ha) y la de guarda (78 ha). Los rendimientos medios son de 44.060 unidades de choclo y 30 t de cebolla, menor que la media nacional que alcanza 46.420 unidades de choclos y 48 t/ha de cebolla.

En la Tabla 4-37 se muestra la superficie cultivada con las principales especies hortícolas de la Región.

Tabla 4-37: Especies hortícolas de la Región de Arica y Parinacota.

Especie	Superficie (ha)	%
Choclo	1001.45	32.39
Tomate consumo fresco	843.38	27.28
Cebolla temprana	264.45	8.55
Poroto verde	174.74	5.65
Pimiento	138.37	4.48
Orégano	109.43	3.54
Zapallo italiano	106.67	3.45
Cebolla de guarda	88.96	2.88
Otras	363.55	11.77

Fuente: ODEPA, 2004.

4.2.3.2. Agricultura Tradicional vs Moderna

El desarrollo de la agricultura en la Región de Arica y Parinacota ha sufrido transformaciones a través del tiempo, en especial, en los Valles de Lluta y Valle de Azapa (Tabla 4-38).

Tabla 4-38: Desarrollo de la agricultura en los valles de la Región de Arica y Parinacota.

Tradicional	Actual	Futura
En el Valle del Lluta, el principal cultivo es el maíz y la alfalfa y en menor superficie, el tomate.	Según el estudio de la ODEPA (2007), la actividad agrícola está concentrada principalmente en las hortalizas como choclo, tomate y orégano. Inicio cultivo en invernadero Uso de agua tratada a través de osmosis inversa y resinas de intercambio iónico Estaciones experimentales: Liceo Napolitano	Intensificación de cultivos de mayor valor agregado Uso mejorado del agua: posible aporte de embalse Chironta Existencia de nuevas actividades productivas: minería

Fuente: Elaboración propia

Antes de los años 90 la agricultura era de tipo tradicional caracterizada por cultivos de maíz y alfalfa, cubriendo grandes extensiones como por ejemplo especies forrajeras 2710 ha y cereales 433 ha.

A mediados de los años 90 hubo una disminución en el área de explotación de cereales mientras que se mantuvo el área para el cultivo de especies forrajeras de 2882 ha.

En el Valle del Lluta sólo se cultivan del orden de las 2.784 ha por razones de disponibilidad de agua de riego, siendo los cultivos principales el maíz (*Zea mays amilaceo*), la alfalfa (*Medicago sativa*), la cebolla (*Allium cepa L.*), el ajo (*Allium sativum L.*), y la betarraga (*Beta vulgaris var. Hortensis L.*) El maíz en los sectores aguas abajo de Poconchile tiene dos cosechas al año, la primera cosecha se cultiva en el período comprendido entre marzo y junio, y la segunda entre septiembre y diciembre; en el área aguas arriba de Poconchile normalmente hay sólo una cosecha. Las hortalizas y el forraje son cultivados durante todo el año. La Tabla 4-39 muestra la superficie cultivada y principales cultivos del valle.

Tabla 4-39: Superficie cultivada con los principales cultivos del Valle del Lluta.

Cultivo	Área (ha)	% de área cultivada
Maíz	1698.4	61.0
Alfalfa	683.9	24.6
Hortalizas	401.9	14.4
Total	2784.2	100.0

Fuente: ODEPA, 2004

La superficie regional de hortalizas asciende a 3.091 ha, lo que representa un 46,3% de la superficie total cultivada a nivel regional y a un 3,2% de la superficie nacional. El sistema de cultivo más utilizado es al aire libre en un 99,24%. Por su parte los cultivos bajo invernadero representan un 0,76%. Es importante consignar la creciente incorporación en los Valles de Azapa y de Chaca del uso de la malla antiáfidos que contribuye de manera relevante a velar por la inocuidad de los productos y reducir el uso de productos fitosanitarios. El principal producto es el tomate, que en los últimos diez años de ha tenido un aumento en la superficie cultivada de un 89%. Este cultivo concentra los más importantes avances tecnológicos, permitiendo rendimientos de 120 toneladas por hectáreas a la fecha.

En la actualidad la actividad agrícola se concentra en las hortalizas como choclo, tomate y orégano, además de los cultivos tradicionales como el maíz y la alfalfa. Además, se fueron incorporando modificaciones en la forma de cultivar, introduciendo el cultivo en invernadero lo que ayuda a aumentar la producción protegiendo los cultivos de las condiciones adversas climáticas presentes en los valles. También incorporando cambios tecnológicos en el tratamiento del agua de riego debido a las concentraciones de Boro y a la salinidad presente en estas, utilizando tecnologías de osmosis inversa y resinas de intercambio iónico.

A esto hay que sumarle la situación futura que se avecina en la zona en cuanto a las nuevas actividades productivas a desarrollarse en la zona, los proyectos de aguas embalsadas y aplicación de una agricultura tecnificada.

4.2.3.3. Calidad de Agua para uso Agrícola

El desarrollo de la actividad agrícola depende, entre otros factores, de la cantidad y calidad del agua disponible para riego. La calidad varía ampliamente de acuerdo a la cantidad y tipo de sales que contenga, ya que algunos compuestos salinos son tóxicos para las plantas; los más importantes para la agricultura son los cloruros, el Sodio, y el Boro.

Los fenómenos tóxicos ocurren cuando ciertos compuestos químicos, tomados por la planta desde el suelo o agua de riego, se acumulan en las hojas durante el proceso de

transpiración, hasta el punto que pueden provocarle daños. El grado del daño depende del tiempo de exposición, así como de la concentración del compuesto tóxico, sensibilidad del cultivo al compuesto y requerimientos hídricos de la planta. Sin embargo, en cantidades adecuadas, estos compuestos salinos, incluido el Boro, son micronutrientes esenciales para el desarrollo adecuado de las plantas superiores.

El conocimiento de la calidad del agua de riego es fundamental para la elección del método de riego, su manejo y el cultivo a implantar. Los aspectos relevantes de la calidad del agua para riego son:

- Alcalinidad: pH, carbonatos
- Sodio
- Salinidad total
- Iones específicos: Sodio, cloruro, Boro, Hierro

Estos valles disponen de agua superficial durante todo el año, las condiciones climáticas son similares, sin embargo los niveles de producción y diversidad de cultivos son diferentes.

4.2.3.4. Valle del Lluta

El agua del río Lluta se caracteriza por tener una alta concentración de sales y otros elementos químicos como Boro, cloruros, y sulfatos, que la hacen inútil para ciertos usos. Desde su nacimiento a la desembocadura predominan diferentes contaminantes.

Las principales características de la calidad del agua de la Cuenca del río Lluta son las siguientes:

- Las mayores fuentes de Arsénico son los ríos Azufre y Colpitas Superior que representan el 86,4% del total de Arsénico de la cuenca.
- La principal fuente de Hierro es el río Azufre, con un porcentaje de 75% del total de Hierro de la cuenca.
- Los ríos Azufre y Colpitas Superior son grandes fuentes de Boro. No obstante, una parte considerable proviene de otras fuentes.
- Los elementos Arsénico y Hierro disminuyen gradualmente desde Tocontasi hasta Panamericana; en tanto el Boro, cloruro y, sulfato aumentan aguas abajo.

El Valle del Lluta es irrigado por el río Lluta; sus aguas tienen alta salinidad, con conductividad eléctrica sobre 2 dS/m y una concentración de Boro superior a 11 mg/L,

situación originada por los afluentes que tiene en su curso superior, los cuales presentan altas concentraciones de elementos químicos en niveles tóxicos para las plantas.

La Tabla 4-40 da cuenta de los constituyentes químicos en los tres sectores del valle; se considera parte alta desde el inicio de la zona de riego, sector Tocontasi, hasta Molinos, parte media entre Molinos y Rosario y parte baja, desde Rosario a Desembocadura.

Por otra parte, dada la disponibilidad de agua y la metodología de riego utilizada en la zona es predecible un aumento de la salinidad de los suelos. Particularmente grave es la situación del Valle del Lluta, donde la existencia de un nivel freático a poca profundidad genera niveles salinos muy altos cercanos a la superficie del suelo, limitando seriamente la agricultura sólo a aquellos cultivos que pueden soportar tales condiciones (Torres, 2008).

El contenido de Boro en algunos ríos del norte del país fluctúa entre 10 y 40 mg/L y alcanza concentraciones de hasta 16 en el río Lluta y de 29 en el río Camarones; estas concentraciones limitan fuertemente el potencial agrícola de estos valles (FIA, 2009).

La mayor parte de las cuencas altiplánicas tienen aguas con un importante contenido de Arsénico y Boro de origen natural. Las zonas agrícolas de los ríos Lluta y San José son fuentes potenciales de contaminación por agroquímicos, aumentando la salinidad de los ríos.

El Valle del Lluta está localizado en el extremo norte de Chile, en la provincia de Arica. Pese a las buenas condiciones climáticas, abundante luz y temperatura, los altos niveles de salinidad y exceso de Boro que se encuentran, tanto en el suelo cultivable como en el agua de riego, son factores limitantes para la producción agrícola de esta zona y en cualquier zona en donde la agricultura sea la principal actividad económica. Los valores de Sodio y Boro encontrados son hasta seis veces mayores a los valores de referencia para los diferentes cultivos. El exceso de salinidad y Boro constituyen dos fuentes de estrés, frecuentemente asociados a ambientes áridos y semiáridos, condición que se presenta en esta región de Chile (Bastías et al., 2011).

Tabla 4-40: Calidad del agua de riego en el Valle del Lluta.

Parámetro	Parte alta	Parte media	Parte baja
pH	7,89	7,79	8,16
CE (dS/cm)	2,2	3,22	5,5
Na^{+} (meq/L)	8,9	11,41	22,17
K^{+} (meq/L)	1,48	1,57	2,56
Ca^{+2} (meq/L)	6,98	9,75	20,24
Mg^{+2} (meq/L)	2,39	4,41	8,46
CO_3 (meq/L)	-	-	1,24
HCO_3 (meq/L)	1,88	1,65	1,57
Cl^{-} (meq/L)	12,00	15,05	31,13
SO_4 (meq/L)	7,35	10,92	21,3
B (mg/L)	12,43	13,46	16,00
RAS	4,11	4,29	5,85
Na %	45,02	42,04	41,65

Fuente: Torres & Acevedo, 2008

4.2.3.5. Valle de Azapa

En el Valle de Azapa se desarrolla una agricultura de riego intensiva, orientada hacia la producción frutícola, fundamentalmente olivo (*Olea europeae L.*), en menor grado mango (*Mangifera indica L.*) y palto (*Persea americana Mill*), y hortícola, tomate (*Licopersicon esculentum*), morrón (*Capsicum annuum L.*), maíz híbrido (*Zea mays L.*), poroto (*Phaseolus vulgaris L.*). Este sector ha tenido un importante aumento en la superficie explotada y en el rendimiento. Sin embargo, en el Valle de Azapa se observa un creciente déficit de recursos hídricos para abastecer la demanda agrícola y de la población.

El Valle de Azapa es irrigado por el río San José; sus aguas son de mejor calidad que las del río Lluta, tienen menor conductividad eléctrica y menor concentración de Boro. La salinidad de los suelos del Valle del Lluta es manifiesta, agravándose en el sector bajo del valle, afectado por problemas de drenaje. En Azapa, los suelos presentan un grado de salinidad inferior, existiendo sectores con presencia de costras salinas en superficie. El efecto del tenor salino en el rendimiento de los cultivos ha sido un tema ampliamente discutido por diferentes autores, quienes dan cuenta de la relación de la salinidad total, y del Boro en particular, con la producción de los cultivos, en un ambiente edáfico adverso para la gran mayoría de las glicófitas (Torres, 2008).

El agua superficial de la Cuenca del río San José y la trasvasada desde la Cuenca del río Lauca tenían en el año 1990 conductividad eléctrica entre 0,6 y 0,8 dS/m, valor inferior al del agua subterránea. Sin embargo, durante los últimos 30 años se ha

observado un significativo deterioro de la calidad. La variación estacional de STD es mayor en el agua de riego superficial, con menor valor durante los meses de verano. Esto se atribuye a una dilución por precipitación del agua extraída de la Laguna Cotacotani a través del canal Lauca.

Tabla 4-41: Calidad del agua de riego en el Valle de Azapa.

Parámetro	Valle de Azapa
CE (dS/cm)	1.83
Na^{+} (meq/L)	4.09
K^{+} (meq/L)	0.14
Ca^{+2} (meq/L)	9.45
Cl^{-} (meq/L)	9.35
Mg^{+2} (meq/L)	1.88
SO_4^{-2} (meq/L)	5.73
HCO_3^{-} (meq/L)	1.67
B (mg/L)	1.03

Fuente: Torres y Acevedo, 2008

4.2.3.6. Comparación de Ambos Valles

La diferencia se atribuye principalmente a la calidad de los suelos y del agua de riego. El agua del río Lluta presenta valores de CE entre 1,0 y 4,0 dS/m, y la concentración de Boro promedio es de 20 mg/L durante el año. En el Valle de Azapa la calidad del agua es superior, pero también tiene conductividad eléctrica mayor a 1,0 dS/m, mientras que la concentración de Boro es cercana a 1 mg/L (Albornoz et al., 2007).

Tabla 4-42: Comparación de la calidad del agua de riego en el Valle de Azapa y en el Valle del Lluta.

Análisis Químicos	Valle de Azapa	Valle del Lluta
pH	7.96	7.63
CE (dS/m)	1.83	2.34
Calcio (mmol/L)	4.73	4.16
Magnesio (mmol/L)	0.94	1.15
Sodio (mmol/L)	4.09	14.64
Potasio (mmol/L)	0.14	1.09
Bicarbonato (mmol/L)	1.67	1.52
Cloruro (mmol/L)	9.35	18.32
Sulfato (mmol/L)	2.87	4.39
Boro (mg/L)	1.03	20.23

Fuente: Albornoz et al., 2007.

Los valores de pH son bastante homogéneos. Con valores máximos de 7.93 y mínimos de 7.45 rango que permite clasificar a los suelos como ligeramente alcalinos a moderadamente alcalinos. Los valores de CE expresados en mS/cm son variables, tanto entre suelos como, en profundidad de los mismos, encontrándose valores altos en superficie los cuales tienden a disminuir en profundidad. Respecto de los valores alcanzados, el máximo es de 12,5 mS/cm en la estrata superior del suelo 3, el valor mínimo de 1,1 mS/cm, entre los 80 a 110 cm de profundidad del suelo l. en cuanto a la intensidad de la salinidad, los suelos I y 5 pueden ser clasificados; como ligeramente salinos, y los suelos 2, 3, y 4 como medianamente salino. Salvo la primera estrata de los suelos 3 y 4 que se clasifica como fuertemente salina. Los contenidos de Materia orgánica se consideran bajos.

Respecto de los cationes solubles, se encontró un predominio del Calcio cuyos valores promedios en cada perfil tienen un máximo de 1,06 meq/I, suelo 3 y un mínimo de 0,49 meq/I, suelo 5, seguido del Sodio, Magnesio, y Potasio. En general los valores de todos los cationes tienden a disminuir en profundidad.

Entre los aniones solubles destacan los cloruros, con niveles máximos de 5,67 meq/l, suelo 3, y un mínimo de 0.3 meq/I suelo 5. Cantidades que no resultan perjudiciales para los cultivos de la zona (Hernández, 1999).

4.2.3.7. Eficiencia y Costos

La creciente habilitación de superficie cultivada, la menor disponibilidad de agua para el riego y la progresiva exigencia en calidad y sanidad de las hortalizas, especialmente las de consumo en fresco, demandan la búsqueda constante de alternativas que potencien el desarrollo productivo (Mazuela, 2011).

Encontrar soluciones técnicas a las dificultades agronómicas relacionadas con el uso del agua y la salinidad debe ser una preocupación constante, siendo prioritario generar el conocimiento para el óptimo manejo del recurso hídrico disponible.

El uso del suelo en el Valle del Lluta está fuertemente regulado por las siguientes limitantes:

- Salinidad, tanto de los suelos como del agua del río Lluta representada, fundamentalmente, por una alta concentración de sulfatos, cloruros y de Sodio solubles,

- Concentración de Boro en el agua del río Lluta cuyo rango oscila entre 9 y 29 mg/L que se traduce en una limitante general para la adaptación de nuevos cultivos al valle,

- Problemas de drenaje interno de los suelos, que amplifica el efecto de las limitantes anteriormente mencionadas e impiden las prácticas de lixiviación de sales.

Albornoz y colaboradores (2007) plantea una alternativa para aumentar los rendimientos de los cultivos hidropónicos, en especial de tomate, a través del uso de agua desalinizada y desborificada en el Valle del Lluta.

Los aspectos importantes que se están considerando en este momento son:

- Uso de agua tratada para bajar la salinidad y la concentración de Boro. Uno de los métodos más utilizados para reducir las concentraciones de Boro en el agua, es la osmosis inversa, pero tiene costos muy altos y solo reduce en un 50% la concentración.

- Cultivo en ambiente controlado (aumento eficiencia de transpiración). Los cultivos protegidos como en malla antiáfido, plástico e invernadero muestran un aumento en la producción de cultivos como tomate y pimiento debido a que la planta está en mejores condiciones fitosanitarias (Riquelme-Garcés et al., 2013).

En un estudio de CORFO (2000), ya se plantea la idea de usar alternativas para la remoción de Boro en las aguas de la Región de Arica, entre las tecnologías propuestas están: intercambio iónico, osmosis inversa y extracción por solvente.

Tabla 4-43: Tecnologías de tratamiento para el abatimiento de Boro en aguas.

Tecnología de Tratamiento	Osmosis inversa	Intercambio iónico	Extracción por solvente
Efectividad de remoción de Boro	20-25%	99%	>90%
Restricciones técnicas	Calidad del agua a tratar (SS, Cl-, Mg)	Calidad del agua a tratar (Fe, Mg)	-
Efectos secundarios	Producto bajo en salinidad para consumo humano	-	Agrega trazas de alcoholes al agua
Monto inversión US$	8.600.000	1.800.000	6.340.500
Costo operacional US$/m3	2,400	0,237	2,021

Fuente: CORFO, 2000

Se han seguido promocionando el desarrollo de proyectos para implementar tecnologías que permitan dar solución a este problema (CNR, 2013), entre ellos destacan:

- Proyecto Asitec-Universidad de Tarapacá-FIA (2012), Instalación de una planta de tratamiento intrapredial para descontaminación de Boro. Se trata de una planta de abatimiento de Boro que permite remover el elemento químico del agua en base a la acción de una resina sintética.

- Fundación Chile, 2013. Prueba piloto ABAR. Se trata de un sistema de abatimiento de Boro en aguas residuales, rurales y de riego. Es de operación continua, a temperatura ambiente y no requiere pretratamiento, salvo eliminación de turbiedad.

  La Fundación Chile ha desarrollado Las siguiente formulas de estimación de inversión y costo operacional para plantas de osmosis inversa:

Función de estimación de costo

Costo Inversión (millones US$) con caudal de tratamiento Q (L/s)

$y = 0,3485*Q0,6$

$R2 = 1$

Costo Tratamiento (US$) con caudal de tratamiento Q (L/s)

$y = 0,7774 *Q-0,112$

$R2 = 0,9064$

4.3 Hidrología

4.3.1 Relleno de Datos Faltantes

Los resultados de las correlaciones realizadas pata el relleno de los datos faltantes, mostraron que en términos generales, los coeficientes de correlación fueron muy bajos siendo los más altos los correspondientes a los meses de noviembre y abril mientras que los meses restantes mostraron una correlación casi nula.

Por lo anterior, se efectuó el relleno de los datos por período de tiempo en la estadística de la estación Río Colpitas en Alcérreca de la siguiente forma:

- Entre 1962 y 1967, se empleó la estadística rellenada en el estudio de Prisma (1992).
- Entre 1968 y 2000, se usó la estadística rellenada por CADE-IDEPE (2004).
- Entre 2001 y 2011, se usó la correlación con las estaciones Río Caracarani en Humapalca y Río Lluta en Alcérreca.

Integrando todo lo anterior, se elaboró una serie completa rellenada de 50 años entre los años 1962 y 2011 de la estación Río Colpitas en Alcérreca, la cual se presenta en la Tabla 4-44.

Tabla 4-44: Estadística rellenada de caudales medios mensuales (m^3/s) en río Colpitas en Alcérreca.

Año /Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1962	0.64	0.97	0.57	0.58	0.50	0.50	0.48	0.42	0.45	0.45	0.48	0.56
1963	1.22	0.38	0.77	0.75	0.78	0.34	0.30	0.50	0.54	0.48	0.48	0.47
1964	0.42	0.49	0.61	0.31	0.64	0.55	0.43	0.54	0.38	0.17	0.41	0.60
1965	0.62	0.75	0.52	0.48	0.44	0.19	0.20	0.41	0.47	0.38	0.33	0.37
1966	0.36	0.35	0.41	0.37	0.35	0.38	0.43	0.40	0.42	0.43	0.50	0.60
1967	0.55	0.07	0.69	0.56	0.62	0.57	0.56	0.50	0.47	0.25	0.73	0.32
1968	0.68	0.77	0.74	0.48	0.41	0.38	0.51	0.43	0.38	0.49	0.50	0.47
1969	0.51	0.85	0.52	0.51	0.52	0.52	0.50	0.46	0.39	0.39	0.39	0.44
1970	0.45	0.42	0.49	0.45	0.49	0.51	0.53	0.50	0.45	0.45	0.43	0.41
1971	1.32	1.53	0.44	0.28	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.28	0.29	0.32
1972	1.06	0.74	0.94	0.53	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.22	0.24	0.23
1973	0.81	1.16	0.73	0.46	0.26	0.25	0.26	0.60	0.47	0.39	0.28	0.27
1974	0.71	0.71	0.71	0.40	0.38	0.59	0.59	0.85	0.35	0.30	0.40	0.36
1975	0.46	0.88	1.58	0.42	0.62	0.58	1.09	1.21	0.36	0.41	0.35	0.61
1976	1.12	2.21	1.33	0.32	0.44	0.47	0.56	0.33	0.40	0.47	0.30	0.34
1977	0.48	0.61	0.82	0.64	0.48	0.49	0.47	0.58	0.45	0.59	0.35	0.38
1978	0.54	1.04	0.57	0.42	0.44	0.40	0.63	0.57	0.45	0.37	0.39	0.38
1979	0.48	0.54	0.80	0.36	0.35	0.28	0.26	0.30	0.32	0.29	0.34	0.37
1980	0.45	0.30	1.97	0.38	0.31	0.28	0.32	0.27	0.30	0.47	0.32	0.38
1981	0.77	3.21	1.59	0.61	0.41	0.28	0.25	0.36	0.33	0.54	0.35	0.97
1982	0.64	0.87	0.80	0.53	0.36	0.31	0.42	0.47	0.40	0.37	0.43	0.48
1983	0.42	0.47	0.43	0.32	0.50	0.48	0.42	0.40	0.36	0.36	0.35	0.45
1984	0.54	1.13	1.22	0.72	0.42	0.40	0.52	0.50	0.36	0.54	0.55	0.51
1985	0.58	1.61	1.16	0.74	0.52	0.49	0.47	0.89	0.39	0.37	0.53	0.66
1986	0.69	1.05	1.54	0.73	0.35	0.41	0.66	0.54	0.41	0.41	0.25	0.44
1987	0.59	1.17	0.51	0.51	0.35	0.35	0.69	0.61	0.35	0.37	0.37	0.33
1988	0.68	0.41	0.47	0.41	0.41	0.42	0.45	0.43	0.37	0.30	0.40	0.46
1989	0.57	0.61	0.35	0.45	0.44	0.44	0.49	0.49	0.45	0.46	0.47	0.48
1990	0.60	0.44	0.50	0.53	0.38	0.67	0.61	0.55	0.32	0.34	0.36	0.52
1991	0.54	0.64	0.74	0.35	0.37	0.45	0.59	0.50	0.32	0.33	0.35	0.31
1992	0.45	0.50	0.32	0.34	0.38	0.44	0.37	0.37	0.35	0.32	0.34	0.32
1993	0.64	0.63	0.78	0.43	0.41	0.43	0.43	0.63	0.35	0.47	0.44	0.38
1994	0.36	2.02	0.53	0.43	0.36	0.41	0.42	0.45	0.30	0.31	0.34	0.38
1995	0.36	0.30	0.46	0.36	0.37	0.35	0.35	0.34	0.32	0.32	0.31	0.32
1996	0.35	0.44	0.39	0.33	0.35	0.39	0.41	0.37	0.33	0.31	0.40	0.37
1997	0.88	1.58	1.13	0.61	0.53	0.31	0.37	0.53	0.40	0.31	0.31	0.30
1998	0.51	0.32	0.29	0.30	0.35	0.42	0.43	0.39	0.31	0.39	0.28	0.30
1999	0.30	1.79	1.56	1.24	0.42	0.46	0.46	0.44	0.34	0.32	0.32	0.31
2000	0.85	1.67	1.87	0.42	0.37	0.41	0.43	0.41	0.28	0.34	0.27	0.31
2001	0.96	1.67	3.03	0.70	0.46	0.52	0.46	0.44	0.48	0.46	0.45	0.50
2002	0.41	1.10	1.58	0.60	0.51	0.51	0.43	0.38	0.37	0.36	0.38	0.39
2003	0.42	0.40	0.56	0.41	0.45	0.45	0.52	0.45	0.42	0.40	0.39	0.40
2004	0.70	1.40	0.51	0.53	0.44	0.53	0.59	0.55	0.46	0.47	0.42	0.44
2005	0.51	0.77	0.52	0.54	0.46	0.54	0.54	0.50	0.49	0.44	0.46	0.49
2006	0.68	1.11	1.08	0.66	0.48	0.50	0.50	0.48	0.46	0.45	0.48	0.49
2007	0.77	0.47	0.67	0.43	0.42	0.45	0.44	0.45	0.42	0.39	0.38	0.41
2008	0.61	0.38	0.46	0.35	0.37	0.38	0.37	0.40	0.46	0.45	0.39	0.41
2009	0.41	0.55	0.65	0.56	0.51	0.47	0.44	0.42	0.56	0.53	0.53	0.42
2010	0.37	0.46	0.41	0.43	0.49	0.45	0.46	0.42	0.39	0.41	0.39	0.43
2011	0.58	1.50	0.67	0.49	0.43	0.39	0.43	0.41	0.42	0.42	0.39	0.52

Dato obtenido de estadística DGA

Dato rellenado a partir de las series generadas para esta misma estación fluviométrica en los siguientes estudios de la DGA:
- "Análisis Estadístico de Caudales en los Ríos de Chile". Prisma Ingeniería Ltda., DGA, 1992.
- "Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad - Cuenca del Río Lluta" Cade-Idepe, DGA, 2004.

Dato corregido a partir de las series generadas para esta misma estación fluviométrica en los siguientes estudios de la DGA:
- "Análisis Estadístico de Caudales en los Ríos de Chile". Prisma Ingeniería Ltda., DGA, 1992.

Dato rellenado a partir de correlación con estación fluviométrica Río Caracarani en Humapalca

Dato rellenado a partir de correlación con estación fluviométrica Río Río Lluta en Alcerreca

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados del presente estudio expresados en la Tabla 4-44 y los resultados obtenidos en los estudios de Prisma (1992) y CADE-IDEPE (2004), en la

Tabla 4-45 se presenta un cuadro comparativo de los caudales medios mensuales obtenidos.

Tabla 4-45: Resumen comparativo de caudales medios mensuales (m^3/s) entre estudios.

AMEC - 2013 (serie de 50 años entre 1961 - 2011)

P Exc.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5%	1.05	2.27	1.89	0.77	0.61	0.59	0.70	0.77	0.50	0.54	0.56	0.66
10%	0.90	1.77	1.52	0.69	0.56	0.55	0.64	0.67	0.48	0.50	0.51	0.58
20%	0.76	1.31	1.16	0.61	0.50	0.51	0.58	0.57	0.45	0.46	0.46	0.51
50%	0.56	0.74	0.69	0.47	0.42	0.43	0.46	0.44	0.39	0.38	0.38	0.40
85%	0.41	0.36	0.39	0.35	0.34	0.32	0.31	0.35	0.32	0.30	0.31	0.32
95%	0.35	0.24	0.32	0.29	0.31	0.26	0.23	0.31	0.28	0.26	0.27	0.28

CADE-IDEPE - 2004 (serie de 33 años entre 1968 - 2000)

P Exc.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5%	0.99	2.26	2.31	0.80	0.54	0.58	1.02	0.79	0.45	0.56	0.51	0.61
10%	0.88	1.81	1.70	0.71	0.51	0.54	0.86	0.70	0.43	0.50	0.47	0.55
20%	0.76	1.38	1.19	0.61	0.47	0.50	0.71	0.61	0.41	0.45	0.42	0.49
50%	0.58	0.82	0.67	0.46	0.40	0.41	0.49	0.46	0.36	0.37	0.35	0.39
85%	0.42	0.43	0.41	0.33	0.33	0.31	0.31	0.34	0.30	0.30	0.29	0.30
95%	0.35	0.30	0.34	0.27	0.29	0.25	0.23	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26

PRISMA - 1992 (serie de 30 años entre 1961 - 1990)

P Exc.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5%	1.49	1.45	1.50	0.95	0.69	0.63	0.62	0.62	0.54	0.57	0.65	0.71
10%	1.21	1.24	1.27	0.83	0.63	0.59	0.58	0.58	0.51	0.53	0.60	0.64
20%	0.94	1.01	1.04	0.71	0.56	0.54	0.53	0.53	0.47	0.48	0.55	0.57
50%	0.58	0.68	0.70	0.52	0.45	0.43	0.42	0.45	0.39	0.39	0.45	0.45
85%	0.33	0.37	0.44	0.36	0.34	0.31	0.30	0.34	0.30	0.28	0.33	0.35
95%	0.29	0.32	0.40	0.33	0.32	0.28	0.27	0.32	0.28	0.25	0.30	0.33

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al cuadro anterior se aprecia que los valores en general son muy similares, solo presentando una diferencia relativamente mayor entre ellos para probabilidades de excedencia bajos (valores extremos de caudal) principalmente en los meses de verano (enero a marzo) asociados al invierno altiplánico.

Por otro lado, el valor del caudal medio anual promedio calculado a partir de la estadística rellenada de cada estudio arroja un valor casi idéntico en los 3 casos entre 0,52 a 0,53 m^3/s. Dichos valores concuerdan también con los valores de caudal promedio anual indicados en los estudios UC (2012) y DICTUC (2008a) de 0,54 y 0,52 m^3/s respectivamente.

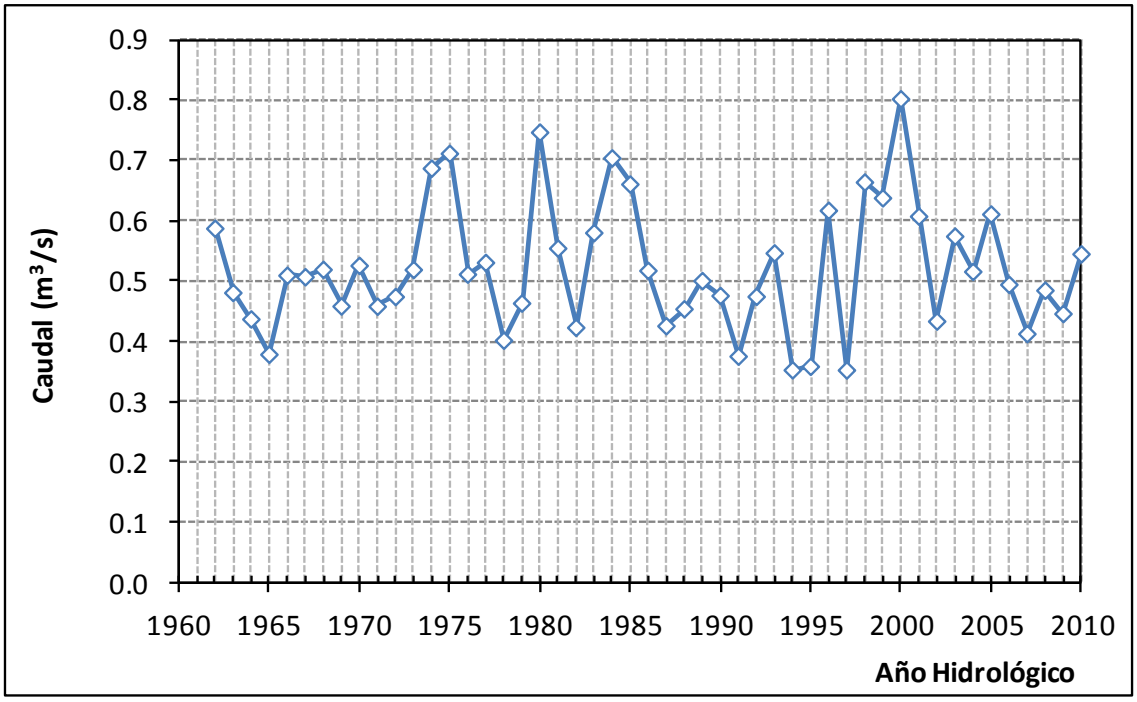
4.3.2 Análisis de Frecuencia

En esta sección se analiza el comportamiento temporal del caudal medio anual y la estacionalidad del caudal medio anal mediante probabilidades de excedencia.

4.3.3 Análisis del Caudal Medio Anual

En la Figura 4-22 se presenta la serie de caudal medio anual para el año hidrológico en la estación río Colpitas en Alcérreca. En esta estación el caudal en es muy variable año a año, observándose crecidas puntuales, destacándose la de los años 1975, 1980, 1984, y 2000. El caudal medio anual máximo registrado es de 0,8 m^3/s en el año hidrológico 1999-2000.

Figura 4-22: Serie de caudal medio anual para un año hidrológico (octubre–septiembre) en la estación fluviométrica río Colpitas en Alcérreca.



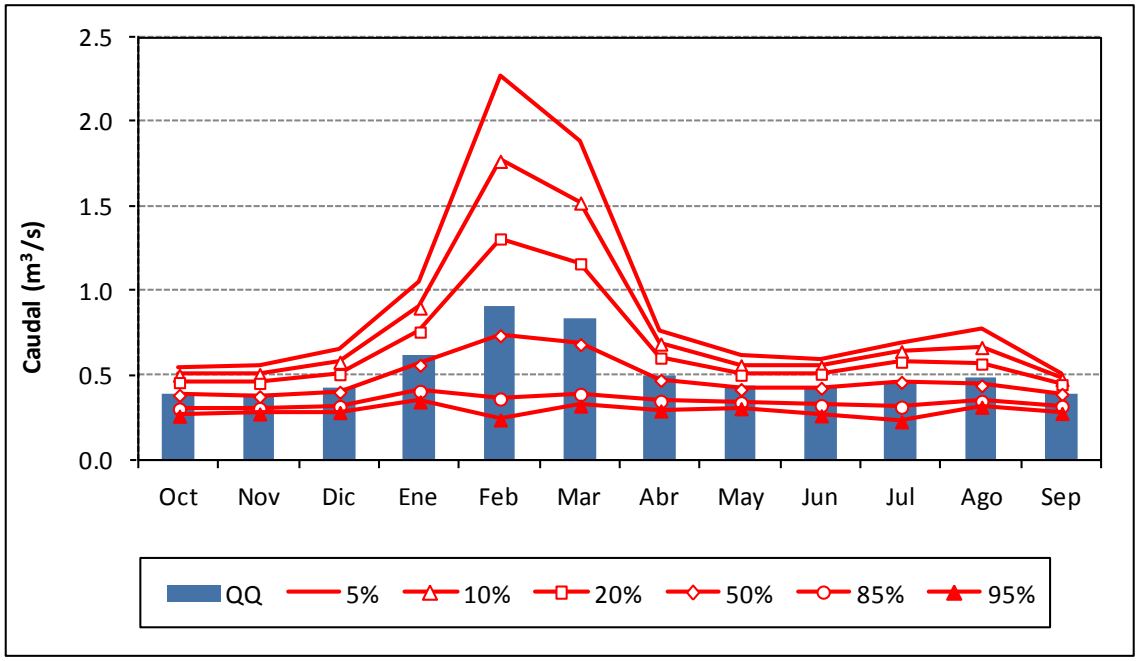
Fuente: elaboración propia.

El caudal promedio (caudal medio anual multianual) es de 0,54 m^3/s, el cual presenta una desviación estándar de 0,11, y coeficientes de asimetría y de variación de 0,64 y 0,20, que muestra una variación anual interpretada como presencia de crecidas puntuales.

4.3.4 Análisis del Caudal Medio Mensual

A partir de la distribución de probabilidad para cada mes según el Test Chi-Cuadrado, se determinaron los valores del caudal medio mensual asociado a una determinada probabilidad de excedencia. En la Figura 4-23 se presentan los caudales mensuales juntos con diferentes probabilidades de excedencia, y en la Tabla 4-46 se presenta los registros de la figura anterior y la distribución de probabilidad correspondiente.

Figura 4-23: Serie de caudal medio mensual y caudales asociados a diferentes probabilidades de excedencia para un año hidrológico (octubre-septiembre) en la estación fluviométrica río Colpitas en Alcérreca.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4-46: Estimación caudales medios mensuales (m^3/s) en río Colpitas en Alcérreca.

Mes	Probabilidad de Excedencia								Distribución Óptima
	95%	85%	50%	20%	10%	5%	2%	1%	
Octubre	0.26	0.30	0.38	0.46	0.50	0.54	0.59	0.62	Gamma
Noviembre	0.27	0.31	0.38	0.46	0.51	0.56	0.62	0.67	Gumbel
Diciembre	0.28	0.32	0.40	0.51	0.58	0.66	0.76	0.84	Log-Pearson III
Enero	0.35	0.41	0.56	0.76	0.90	1.05	1.25	1.42	Log-Pearson III
Febrero	0.24	0.36	0.74	1.31	1.77	2.27	3.00	3.62	Log-Normal
Marzo	0.32	0.39	0.69	1.16	1.52	1.89	2.37	2.75	Pearson III
Abril	0.29	0.35	0.47	0.61	0.69	0.77	0.86	0.94	Log-Normal
Mayo	0.31	0.34	0.42	0.50	0.56	0.61	0.68	0.73	Log-Pearson III
Junio	0.26	0.32	0.43	0.51	0.55	0.59	0.63	0.66	Normal
Julio	0.23	0.31	0.46	0.58	0.64	0.70	0.75	0.79	Normal
Agosto	0.31	0.35	0.44	0.57	0.67	0.77	0.92	1.05	Log-Pearson III
Septiembre	0.28	0.32	0.39	0.45	0.48	0.50	0.53	0.55	Normal

Fuente: elaboración propia.

En términos generales se observa dos periodos. El primer período de enero a marzo, corresponde al período de mayores crecidas producto del 'invierno altiplánico' en el cual se aprecia una gran variabilidad producto de las crecidas puntuales y períodos secos que ocurren durante los meses estivales. El segundo período de abril a Diciembre representan los caudales base del río en período seco, en el cual la desviación estándar mensual de los caudales es muy baja, lo que permite considerarlos como caudales base promedio mensuales.

4.3.5 Caudal Medio Mensual en Diferentes Sectores de la Cuenca del Río Colpitas

Se determinó los rendimientos específicos medios mensuales expresados en l/s por km^2 a partir de los caudales medios mensuales determinados en la estación Río Colpitas en Alcérreca presentados en la Tabla 4-46, y teniendo en cuenta que la superficie aportante a la estación río Colpitas en Alcérreca es de 459,02 km^2 (Tabla 4-47).

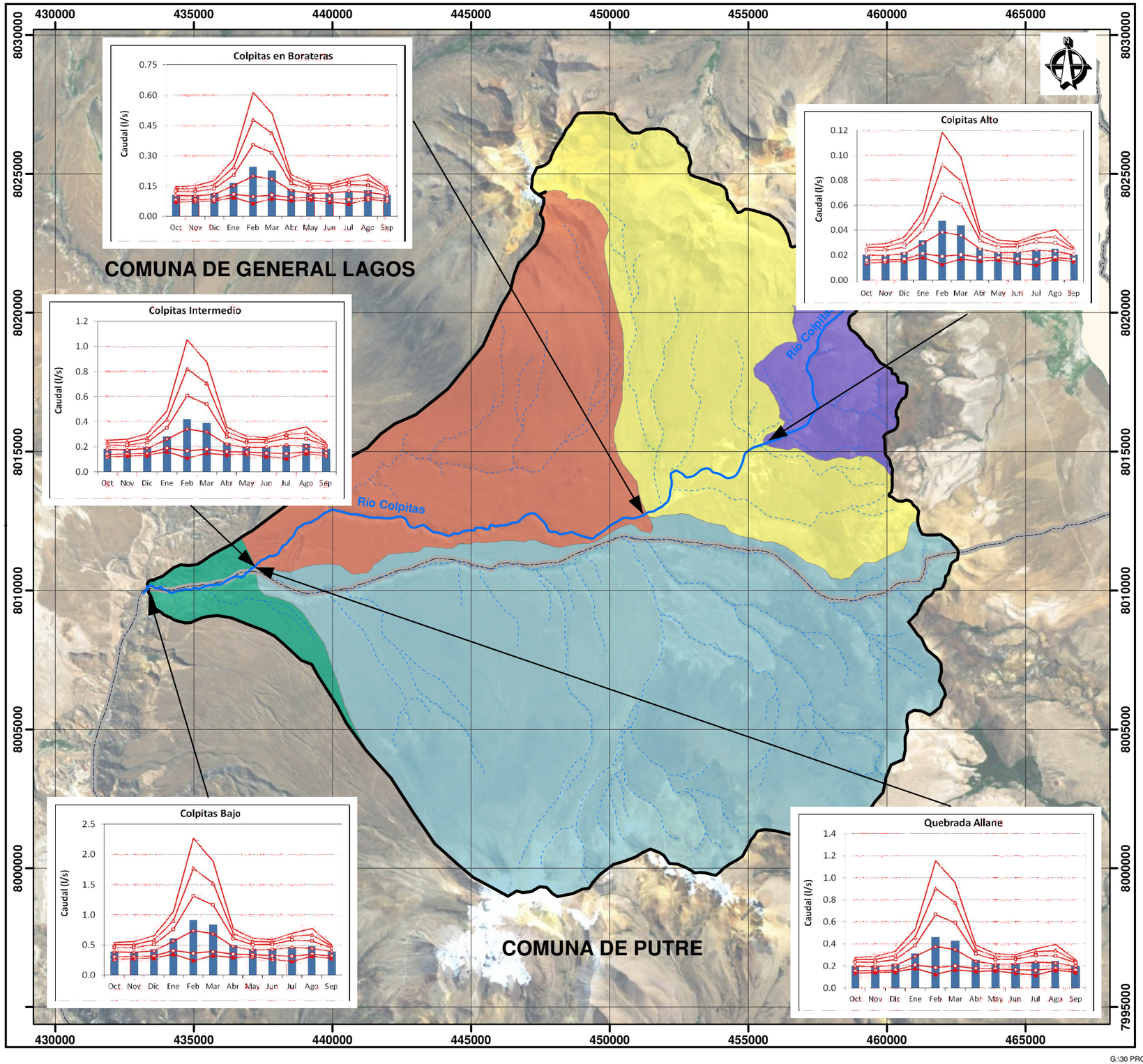
Tabla 4-47: Rendimientos específicos medios mensuales (L/s/km^2) en río Colpitas en Alcérreca.

Mes	Probabilidad de Excedencia							
	95%	85%	50%	20%	10%	5%	2%	1%
Octubre	0.57	0.66	0.84	1.00	1.10	1.18	1.28	1.34
Noviembre	0.60	0.67	0.82	0.99	1.11	1.22	1.36	1.46
Diciembre	0.62	0.69	0.88	1.11	1.27	1.43	1.65	1.82
Enero	0.75	0.89	1.23	1.66	1.97	2.28	2.73	3.09
Febrero	0.52	0.79	1.61	2.86	3.86	4.95	6.54	7.88
Marzo	0.70	0.85	1.49	2.54	3.32	4.11	5.17	5.99
Abril	0.64	0.76	1.03	1.32	1.50	1.67	1.88	2.04
Mayo	0.67	0.74	0.91	1.10	1.22	1.33	1.48	1.59
Junio	0.57	0.71	0.93	1.11	1.21	1.29	1.37	1.43
Julio	0.50	0.69	1.01	1.27	1.40	1.52	1.64	1.73
Agosto	0.69	0.76	0.96	1.24	1.46	1.68	2.01	2.29
Septiembre	0.61	0.70	0.85	0.98	1.04	1.10	1.16	1.20

Fuente: elaboración propia.

A partir de los rendimientos específicos se determinó los caudales medios mensuales según diferentes probabilidades de excedencia para los 5 sectores de la Cuenca del río Colpitas definidos en el acápite 4.1. En la Figura 4-24 se presenta cada serie de caudales medios mensuales por sector en la Cuenca del río Colpitas, y cuyos valores se presentan en el Anexo A, Sección 10.1.3.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco



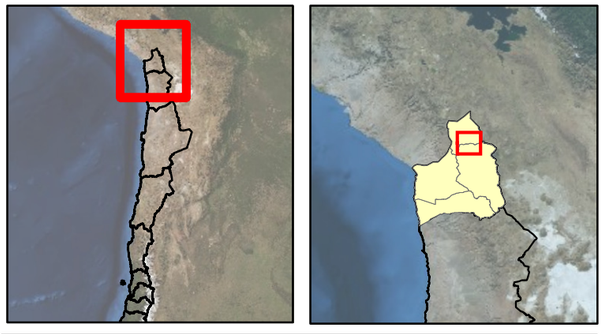
Leyenda

Zonificación

- Zona 1: Sector Colpitas Alto
- Zona 2: Sector Colpitas en Borateras
- Zona 3: Sector Colpitas Medio
- Zona 4: Sector Quebrada Allanes
- Zona 5: Sector Colpitas Bajo
- Río Colpitas
- Quebradas
- Límite comunal

Leyenda gráfico

QQ — 5% — 10% — 20% — 50% — 85% — 95%



TITULO

Caudales Medio Mensuales y Probabilidades de Excedencia en la cuenca del río Colpitas.

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N° E90008	ESCALA:	E. GRAFICA: 2 1 0 2 Km	FIGURA 4-24

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-24.mxd

4.3.6 Cálculo de Aforos

La Tabla 4-48 presenta los resultados de aforo de las campañas de terreno, cuyos puntos pueden verse en el unifilar del sistema hídrico de la Cuenca del río Colpitas. Estas mediciones fueron realizadas por la empresa SGS, con supervisión directa en terreno del personal de AMEC.

Las mediciones se efectúan en base a protocolos previamente establecidos y con procedimientos de aseguramiento de calidad, que incluyen cadena de custodia. Los procedimientos y fichas de registro se informan en la Sección 2.2.2.

Los cálculos de aforo se realizan con la velocidad media de acuerdo a la profundidad del cauce, y con esto se realiza la determinación del caudal total por cada punto de muestreo.

Los certificados de las mediciones de aforo se encuentran en el Anexo A, Sección 10.1.4.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Tabla 4-48: Caracterización de aforos campañas N°1, 2, y 3.

Parámetro	Unidad	Punto N°	PM1				PM2				PM3			PM5				PM6		
			C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3
Profundidad	m	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		2	0,28	0,18	0,28	0,12	0,10	0,14	0,10	0,12	0,10	0,115	0,10	0,36	0,10	0,36	0,40	0,15	0,12	0,15
		3	0,30	0,20	0,30	0,14	0,12	0,18	0,12	0,14	0,10	0,115	0,10	0,36	0,16	0,36	0,40	0,25	0,14	0,25
		4	0,26	0,20	0,26	0,10	0,13	0,20	0,13	0,15	0,10	-	0,10	0,36	0,22	0,36	0,40	0,30	0,20	0,30
		5	0,00	0,16	0,00	-	0,11	0,20	0,11	0,15	0,10	-	0,10	0,36	0,33	0,36	0,40	0,28	0,25	0,28
		6	-	0,16	-	-	0,00	0,16	0,00	0,14	0,00	-	0,00	0,36	0,443	0,36	0,40	0,20	0,15	0,20
		7	-	-	-	-	-	0,18	-	0,14	-	-	-	0,00	-	0,00	0,16	0,14	0,10	0,14
		8	-	-	-	-	-	0,18	-	0,13	-	-	-	-	-	-	-	0,00	-	0,00
		9	-	-	-	-	-	0,10	-	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Velocidad	m/s	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		2	0,20	0,50	0,20	0,20	0,70	1,50	0,70	0,20	0,20	0,10	0,20	0,70	1,40	0,70	1,00	0,50	1,80	0,50
		3	0,30	0,80	0,30	0,30	0,70	1,50	0,70	0,40	0,20	0,30	0,20	0,80	1,50	0,80	1,80	0,60	2,00	0,60
		4	0,30	1,20	0,30	0,20	0,60	1,70	0,60	0,40	0,20	-	0,20	0,80	1,20	0,80	0,80	0,80	2,60	0,80
		5	0,00	1,10	0,00	-	0,50	1,70	0,50	0,50	0,20	-	0,20	0,70	2,20	0,70	1,00	0,60	3,00	0,60
		6	-	0,50	-	-	0,00	2,30	0,00	0,40	0,00	-	0,00	0,70	2,00	0,70	1,00	0,50	2,10	0,50
		7	-	-	-	-	-	1,70	-	0,50	-	-	-	0,00	-	0,00	0,80	0,40	130	0,40
		8	-	-	-	-	-	0,70	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-	0,00	-	0,00
		9	-	-	-	-	-	0,50	-	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Área	m^2	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		2	0,0283	0,0183	0,0283	0,027	0,0615	0,0435	0,0615	0,054	0,0150	0,0460	0,0150	0,0720	0,0988	0,0720	0,120	0,2375	0,1825	0,2375
		3	0,0293	0,0193	0,0293	0,021	0,0683	0,0503	0,0683	0,042	0,0100	0,0115	0,0100	0,0720	0,0725	0,0720	0,080	0,2188	0,1400	0,2188
		4	0,0265	0,0195	0,0233	0,015	0,0743	0,0578	0,0743	0,045	0,0100	-	0,0100	0,0720	0,1056	0,0720	0,080	0,2788	0,1838	0,2788
		5	0,0000	0,0255	0,0033	-	0,0623	0,0585	0,0623	0,045	0,0250	-	0,0200	0,0720	0,1506	0,0720	0,080	0,2775	0,2188	0,2775
		6	-	0,0160	-	-	0,0248	0,0533	0,0248	0,042	0,0000	-	0,0150	0,3160	0,0888	0,3160	0,080	0,2225	0,2500	0,2225
		7	-	-	-	-	-	0,0518	-	0,042	-	-	-	0,0000	-	0,0000	0,080	0,1625	0,1375	0,1625
		8	-	-	-	-	-	0,0270	-	0,039	-	-	-	-	-	-	-	0,0000	-	0,0000
		9	-	-	-	-	-	0,0240	-	0,126	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4-48: Caracterización de aforos campañas N°1, 2, y 3. (Continuación).

Parámetro	Unidad	Punto N°	PM1				PM2				PM3			PM5				PM6		
			C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3
Caudal	m^3/s	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		2	0,0057	0,0091	0,0057	0,005	0,0431	0,0653	0,0431	0,011	0,0030	0,0046	0,0030	0,0504	0,1383	0,0504	0,120	0,1188	0,3285	0,1188
		3	0,0088	0,0154	0,0088	0,006	0,0478	0,0754	0,0478	0,017	0,0020	0,0035	0,0020	0,0576	0,1088	0,0576	0,144	0,1313	0,2800	0,1313
		4	0,0080	0,0234	0,0070	0,003	0,0446	0,0982	0,0446	0,018	0,0020	-	0,0020	0,0576	0,1268	0,0576	0,064	0,2230	0,4778	0,2230
		5	0,0000	0,0281	0,0000	-	0,0311	0,0995	0,0311	0,023	0,0050	-	0,0040	0,0504	0,3314	0,0504	0,080	0,1665	0,6563	0,1665
		6	-	0,0080	-	-	0,0000	0,1225	0,0000	0,017	0,0000	-	0,0000	0,2212	0,1775	0,2212	0,080	0,1113	0,5250	0,1113
		7	-	-	-	-	-	0,0880	-	0,021	-	-	-	0,0000	-	0,0000	0,064	0,0650	0,1788	0,0650
		8	-	-	-	-	-	0,0189	-	0,012	-	-	-	-	-	-		0,0000	-	0,0000
		9	-	-	-	-	-	0,0120	-	0,013	-	-	-	-	-	-		-	-	-
Caudal Total	m^3/s	-	0,0224	0,0840	0,0214	0,0147	0,1665	0,5796	0,1665	0,1302	0,0120	0,0081	0,0110	0,4372	0,8826	0,4372	0,5520	0,8158	2,4463	0,8158

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Calidad Agroclimática

De acuerdo a la información que registra la red de estaciones meteorológicas de la región, respecto a las precipitaciones acumuladas, continúa una condición por debajo de un año normal, con ausencia de precipitaciones en la precordillera, arrojando déficit que bordean los 26% y 17% en Socoroma y Visviri respectivamente. Sin embargo, el mayor déficit se registra en los valles costeros, llegando incluso a un 50% por debajo de un año normal, con 2,2 mm promedio, a la fecha.

La alta humedad relativa presente en los valles costeros (60-70%), generan un ambiente favorable para el desarrollo de enfermedades fungosas, especialmente en los sistemas de cultivos protegidos (tomate, pimiento), cuya ventilación es deficiente, razón por la cual se recomienda no descuidar el monitoreo de estos cultivos. Además se recomienda monitoreos preventivos de plagas, debido al aumento paulatino de las temperaturas, especialmente en cultivos al aire libre como el de olivos.

Las temperaturas en tanto, se han presentado bajo lo normal, dos a tres grados por debajo del año anterior, especialmente en el altiplano. En zonas de cultivo, esta situación no afectaría mayormente la producción del año agrícola, pero se mantiene la recomendación del uso de manto térmico, en caso de disminución de temperaturas ya que al aire libre se registran temperaturas por debajo del umbral de confort de las plantas, especialmente aquellos cultivos muy sensibles como el poroto verde en sus primeras etapas de desarrollo (10°C).

Respecto a la condición hídrica, en este período disminuye la cantidad de agua disponible en vertientes y ríos en la precordillera de la región. En los valles costeros en tanto, el río Lluta ha mantenido su caudal y el río San José por su parte, continúa con la ausencia de escorrentía superficial en la parte alta, media y baja del Valle de Azapa. No obstante; lo anterior, la situación hídrica de los valles, resulta ser favorable para el sector agrícola, en términos de acumulación períodos anteriores, siendo recomendadas tasas de reposición normales.

4.5 Geofísica

Se realizaron cuatro perfiles con una longitud total de 3080 metros de perfiles instalados. Las ubicaciones generales de los perfiles (Figura 4-25) son las siguientes:

- Perfil 1: Aguas abajo de las borateras (perfil de 800m)
- Perfil 2: La salida de la cuenca aguas arriba de la confluencia del Rio Lluta (perfil de 800m)
- Perfil 3: La Quebrada Huanuni (perfil de sólo 680m debido a un precipicio)
- Perfil 4: A través de una boratera aguas arriba de Perfil #1 (perfil de 800m)

Para el trabajo de tomografía eléctrica fueron utilizadas las siguientes configuraciones del levantamiento geofísico (ver Tabla 4-50). Cabe notar que a todas las posiciones de electrodos se les agrega agua para obtener un contacto adecuado. Toda la información fue procesada con el algoritmo RES2DINV, considerado como uno de los tres códigos de estándar industrial. El proceso aplicado es el robusto, que se distingue del proceso suavizado por la rutina de minimización de diferencias absolutas entre los datos observados y modelados de forma iterativa. De esta forma, el algoritmo tiene la oportunidad de reconstruir fuertes cambios de resistividad como se espera en el subsuelo pasando entre el sedimento y el intrusivo. En comparación, el proceso suavizado minimiza el cuadrado de la diferencia entre valores observados y calculados, lo que le genera un carácter de construir modelos suavizados con gradientes de resistividad no tan fuertes. Mientras ambas tienen sus aplicaciones, para el presente trabajo fue seleccionado el método robusto.

A continuación se describen los modelos de resistividad eléctrica obtenidos de los perfiles realizados.

Figura 4-25: Ubicación general de los perfiles geofísicos dentro de la cuenca del río Colpitas.

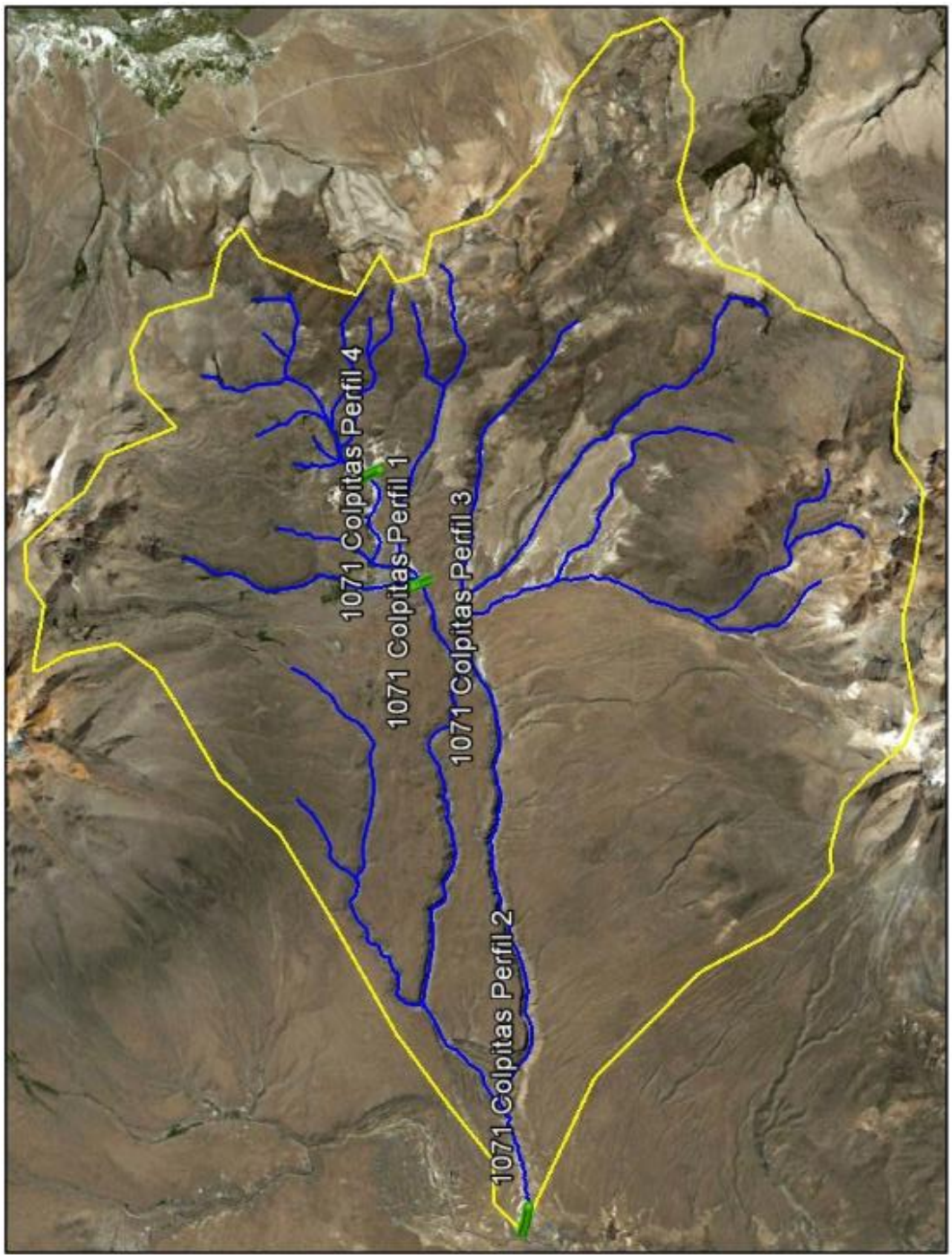


Tabla 4-49: Resumen de los perfiles.

Ítem	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
Técnica	Tomografía eléctrica	Tomografía eléctrica	Tomografía eléctrica	Tomografía eléctrica
Largo total	800 m	800 m	680 m	800 m
Distancia entre electrodos	10 m	10 m	10 m	10 m
Preparación de puntos	Taza con agua	Taza con agua	Taza con agua	Taza con agua
Configuración utilizada	Gradiente plus	Gradiente plus	Gradiente plus	Gradiente plus
Corriente	Entre 58 y 200 mA	Entre 23 y 345 mA	Entre 60 y 200 mA	Entre 37 y 99 mA
Cantidad puntos registrados	848	848	636	848
Ruido registrado	<0,4% en promedio	<2,1% en promedio	<0,1% en promedio	<1,1% en promedio
Topografía incorporada	C	41 puntos	35 puntos	41 puntos
Tipo proceso utilizado	Robusto de criterio uniforme	Robusto de criterio uniforme	Robusto de criterio uniforme	Robusto de criterio uniforme
Secuencia aplicada	2 corridas de 7 iteraciones	2 corridas de 7 iteraciones	2 corridas de 7 iteraciones	2 corridas de 7 iteraciones
Tipo de exclusión de datos	RMS edit	RMS edit	RMS edit	RMS edit
Error RMS final	0,99%	1,9%	1,0%	1,7%

4.5.1 Perfil 1

El Perfil 1, con una longitud de 800 metros, se trazó de forma perpendicular al eje del cauce principal de la cuenca, aguas abajo de las Borateras en sentido noroeste-sureste (ver Anexo C, Sección 10.3.1).

En este modelo se pueden diferenciar tres niveles. La capa más superficial caracterizada por valores de resistividad eléctrica medios a altos (150 a 3000 Ωm), exceptuando en el tramo que cruza el río (entre las coordenadas internas x= 510 m – 630 m). Esta capa superficial carece en la zona del río y va aumentando hasta los 30 metros en ambos extremos del modelo. El límite inferior de este nivel se interpreta como el nivel freático, ya que se aprecia un acusado gradiente negativo propio de este tipo de contactos debido al contacto con la zona saturada, y una morfología sub-horizontal. Bajo ese límite, se desarrolla un nivel con valores medios (entre 33 y 90 Ωm), posiblemente se trate del mismo tipo de material que el que se encuentra en superficie, pero los valores de resistividad son significativamente menores por encontrarse dentro de la zona saturada. Este nivel presenta espesores entre 20 metros y 55 metros en la zona del cauce. La última capa y más profunda se caracteriza porque presenta un aumento en el valor de las resistividades eléctricas respecto al nivel anterior (90 Ωm – 150 Ωm). Este cambio en los valores de resistividad es debido a un cambio en la porosidad del material, y por tanto, un cambio de material, que se extiende hasta más allá de la máxima profundidad de investigación (140 metros).

En general el modelo presenta una distribución unidimensional, con una distribución en niveles sub-horizontales propios de materiales sedimentarios (tanto vulcanosedimentarios como fluvio-aluvionales).

Los valores de resistividad a su vez no se caracterizan por poseer valores excesivamente bajos que pudieran asociarse a altas concentraciones de salinidad.

El límite del nivel freático interpretado (marcado en línea roja discontinua), indica la existencia de un acuífero superficial en que aparece en la situación del cauce. Es probable que este se extienda en profundidad, aunque también es probable que se produzca un cambio en la zona del material más profundo.

4.5.2 Perfil 2

El Perfil 2 se levantó de forma longitudinal al perpendicular al eje del cauce principal del río Colpitas, en su parte final, en la quebrada Iquilla, próximo a la intersección con la quebrada Caracarani con una longitud de 800 metros (ver Anexo C, Sección 10.3.1).

Este modelo presenta una distribución de los valores de resistividad similar al anterior, en tres niveles o capas. No obstante, a simple vista destaca el hecho de que los valores son bastante inferiores.

Así, la primera capa superficial, presenta valores de resistividad medios y bajos (350 Ωm a 10 Ωm, con un valor promedio de 20 Ωm) con algunos cambios laterales pero en general continua, excepto en los cruces con el cauce. Este nivel posee espesores de entre 0 metros en el cruce con el cauce y 30 metros. Probablemente se encuentre formado por materiales de pequeño tamaño de grano, tipo limos. Inmediatamente bajo este nivel, aparece una capa más homogénea en cuanto a bajos valores de resistividad (en torno a 10 Ωm) lo cual posiblemente está relacionado con la existencia de mayor humedad, lo cual no implica un cambio litológico, sino que se encuentre el material dentro de la zona saturada. Este nivel posee espesores de entre 60 m y 100 metros en algunos casos. Inmediatamente subyacente, comienzan a aumentar los valores de resistividad de forma gradual, lo cual está indicando un cambio de material, probablemente de mayor tamaño de grano (más arenoso).

Se ha interpretado la presencia de un nivel freático en superficie (en línea roja discontinua) que indica la presencia de un acuífero superficial no confinado. Por lo general este modelo presenta valores de resistividad bajos, lo cual indica que los materiales sobre los que se ha levantado el perfil son de tamaño de grano pequeño, y que probablemente se encuentren saturados a partir de una profundidad de alrededor de 20 metros en los casos más profundos. Es importante destacar que los valores observados son propios de materiales finos que son los menos permeables. Aunque también pudiera ser el caso de que la salinidad de las aguas en esta zona sea alta.

4.5.3 Perfil 3

El Perfil 3 se levantó a un kilómetro al suroeste del Perfil 1, de forma oblicua al cauce de la quebrada Allane, con una longitud de 680 metros (ver Anexo C, Sección 10.3.1).

Este modelo es similar al Perfil 1. Sin embargo, se podría diferenciar del anterior modelo en que es posible distinguir únicamente dos capas en función de los valores de resistividad. La primera se extendería desde la superficie hasta una profundidad máxima de 80 metros y se caracteriza por poseer valores de resistividad en general medios (160 Ωm) aunque en la parte final del modelo se aprecian valores mayores. Este nivel podría estar asociado a materiales de tamaño de grano medio y/o con poco contenido en humedad.

No obstante, la superficie de forma discontinua, se observa un nivel con un espesor de 5 – 10 metros con valores medios de resistividad (70 Ωm) asociados a depósitos de finos y mayor humedad en el lecho del río.

Bajo el anterior nivel se distingue un descenso paulatino de los valores de resistividad. El límite no es marcado, por lo que se asocia a un cambio gradual a otro material.

Los valores de resistividad por lo general marcan una distribución homogénea en niveles sub-horizontales lo cual refleja el ambiente deposicional de la zona. En el

presente modelo, a diferencia de los dos anteriores, no se distingue un nivel freático claro, a pesar de ello se ha marcado en la zona del cauce un posible nivel interpretado. No se distinguen valores muy bajos que pudieran indicar altos contenidos salinos.

4.5.4 Perfil 4

El Perfil 4 se realizó a tres kilómetros aguas arriba del Perfil 1, de forma transversal al cauce principal de la cuenca, sobre las Borateras. Posee una longitud de 800 metros (ver Anexo C, Sección 10.3.1).

Este modelo se distingue de los anteriores claramente pues posee a simple vista valores de resistividad bajos a muy bajos (1 Ωm – 10 Ωm).

El perfil cruza el cauce desde la ladera norte a la sur, lo cual se observa claramente en el modelo, donde en la parte inicial del modelo y la final se observan valores de resistividad medios (80 Ωm – 150 Ωm). Bajo estas zonas, y en superficie en la parte central del modelo, coincidente con la llanura aluvial, aparecen desde superficie y hasta más allá de la máxima profundidad de investigación (140 metros) valores de resistividad bajos a muy bajos (< 10 Ωm) excepto un nivel que aparece en la zona de la llanura aluvial, a una profundidad de entre 5 y 10 metros, y de unos 20 metros de espesor y discontinuo que presenta valores algo mayores (10 Ωm – 45 Ωm) que presenta la signatura típica de paleo-canales, con materiales tipo gravas y arenas que se refleja en ese rango de valores de resistividad.

El modelo se caracteriza por presentar valores muy bajos de resistividad en la parte central del modelo, los cuales, además de indicar la presencia de una zona saturada casi desde la superficie, indica una alta concentración salina, dado que son valores muy bajos.

En general, los perfiles geofísicos completados como parte de este proyecto confirman parte del modelo conceptual hidrogeológico presentado en este documento: un marco de lecho rocoso volcánico cubierto con sedimentos aluviales no consolidados superficiales en los alrededores de los ríos. Las aguas subterráneas en el lecho rocoso probablemente forman parte de los sistemas de flujo intermedio o regional, y el lecho rocoso tiene probablemente una importancia hidrogeológica relativamente bajo. Algunos depósitos no consolidados (como materiales aluviales y borateras) son más permeables. Estos más probables son sistemas de flujo locales como se discutió anteriormente. Ellos forman acuíferos no confinados superficiales que generalmente se depositaron horizontalmente. No se encontraron otras unidades hidroestratigráficas no consolidadas (por ejemplo glacial, lacustre, palustre, eólica, ni los sedimentos coluviales) durante la campaña geofísica. El número limitado de los perfiles, y su

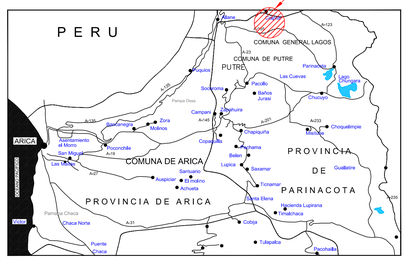
longitud relativamente corta, impidieron un examen detallado de las relaciones geológicas y de las características hidrogeológicas de la cuenca.

4.6 Topografía

En la Figura 4-26 se presenta un ejemplo del resultado del levantamiento topográfico realizado según se describió en la metodología. El resto de los levantamientos topográficos pueden ser encontrados en el Anexo B, Secciones 10.2.2 y 10.2.3.

PLANTA GENERAL
LEVANTAMIENTO RIO COLPITAS
ESCALA 1:1500
Km 0,000 - 1,000

Croquis de Ubicacion
Esc 1: 50.000


SECTOR RIO COLPITAS
PUEBLO COLPITAS
P E R U
COMUNA GENERAL LAGOS
COMUNA DE PUTRE
PUTRE
Parinacota
Las Cuevas
Chucuyo
Choquelimpie
Belén
Socoroma
Livilcar
Saxamar
Tignamar
Guallatire
Lupica
Sotoca
Tignamar
Fonsanar
Tambo Quemado
Ancuta
Chapiquiña
Copaquilla
Zapahuira
Camarones
Molinos
Aranta
Acha
Pachica
Tignamar
Tignamar
Tignamar

4.7 Percepción Remota

Con el propósito de contribuir a una mejor caracterización del Valle del río Colpitas en la Región de Arica Parinacota, se desarrolló un estudio espacial mediante percepción remota, asociada al uso de imágenes satelitales.

El objetivo definido para esta actividad fue obtener una caracterización hidromorfométrica detallada de la Cuenca del río Colpitas, con una identificación de los drenes y subcuencas aportantes a la Cuenca de la Quebrada Colpitas, estableciendo, longitudes de cauce, superficie, altura y pendientes de subcuencas, e índice de compacidad de subcuencas. Todos estos factores contribuyen a explicar las condiciones de escurrimiento y representan un insumo necesario para realizar el modelamiento hidrológico a partir de la elaboración de un Modelo Digital de Terreno (Figura 4-27).

Las características físico-químicas de las aguas están directamente relacionadas con las características del substrato por donde éstas escurren. Por ello se hace necesario identificar y caracterizar las distintas unidades de sustrato (suelo) presentes en la Cuenca del río de Colpitas por donde pasan las aguas de sus distintos afluentes.

Los objetivos generales de este trabajo fueron realizar una caracterización morfométrica de la cuenca, subcuencas, y red drenaje, y caracterización de sustrato de la Cuenca del Colpitas mediante la identificación de componentes principales.

Los resultados se presentan agrupados en tres categorías:

- Propiedades morfométricas de la cuenca y subcuencas,
- Propiedades de la red de drenaje,
- Análisis multiespectral de imagen satelital.

La presentación de cada resultado va precedida de una breve explicación del significado y alcance de cada uno de los indicadores o parámetros calculados.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

435000 440000 445000 450000 455000 460000

8025000 8020000 8015000 8010000 8005000 8000000

COMUNA DE GENERAL LAGOS

Río Colpitas

Colpitas

Allanes

Río Colpitas

COMUNA DE PUTRE

Leyenda

DEM Aster V2

5829

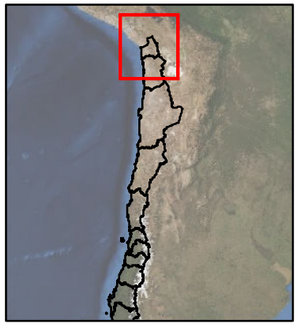
3544

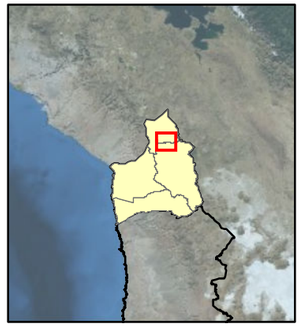
Río Colpitas

Quebradas

Cuenca Río Colpitas

Límite comunal





TITULO

Modelo Digital de Terreno
DEM Aster V2
Cuenca Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1: 150.000	2 1 0 2 Km	4-27

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-27.mxd

4.7.1 Propiedades Morfométricas de Cuenca y Subcuencas

4.7.2 Delimitación de Cuenca y Subcuencas

Como punto de partida para el análisis morfométrico se toma la definición de las cinco subcuencas principales que se establecen en el Informe de Avance Nº 1, que corresponden a las subcuencas de:

- Colpitas Alto (1),
- Colpitas en Borateras (2),
- Colpitas Medio (3),
- Quebrada Allanes (4),
- Colpitas Bajo (5).

Mediante el uso del SIG GRASS (grass.osgeo.org) y su módulo *watershed* se procesó el AsterDEM para identificar subcuencas y red de drenaje en forma automática. De este procesamiento se obtuvieron un total de 59 subcuencas, que se distribuyen como se ilustra en la Figura 4-28. A cada subcuenca se le asignó un identificador de tres dígitos, donde el primero corresponde a la subcuenca principal y los dos restantes a un número secuencial dentro de cada subcuenca principal. El total de subcuencas por cada subcuenca principal se presenta en la Tabla 4-50.

Tabla 4-50: Número de subcuencas por subcuenca principal.

Subcuenca Principal	Número Subcuencas
Colpitas Alto	5
Colpitas en Borateras	10
Colpitas Medio	14
Quebrada de Allanes	29
Colpitas Bajo	1

4.7.3 Superficie de Subcuencas

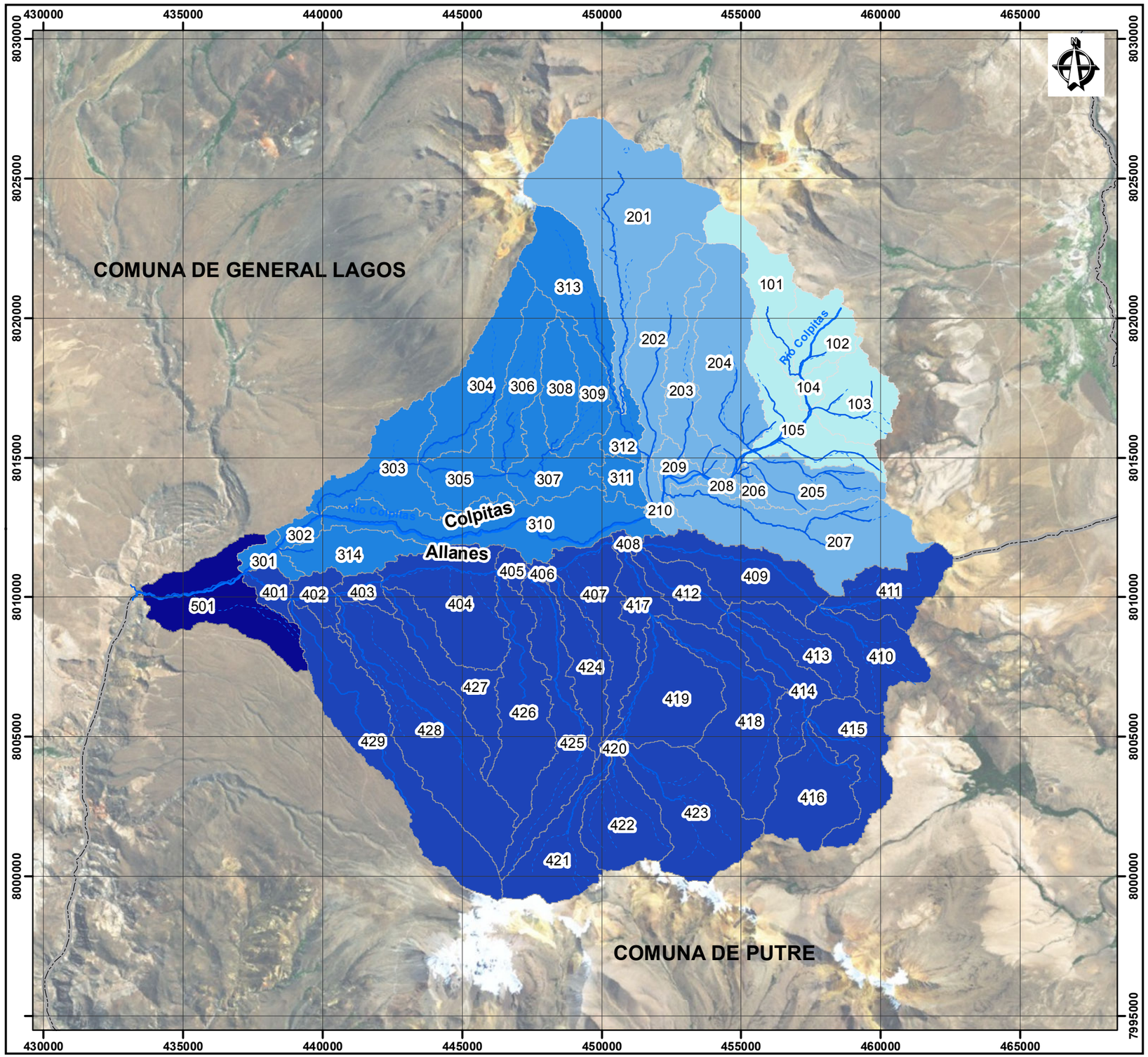
El tamaño de las subcuencas es importante en el sentido que el agua que cae como precipitación, sea sólida o líquida, es proporcional al tamaño de la cuenca y por lo tanto un indicador directo de la cantidad de agua que puede producirse en cada una de ellas. Sin embargo, esto debe ser relacionado con la altitud media de las cuencas.

La superficie de las subcuencas en Colpitas varía entre los 0,1 km^2 a 27,5 km^2, siendo mayoritario el rango que va desde los 5,6 a 11 km^2 (ver Figura 4-29). Se debe señalar que los valores de superficie corresponden al área planimétrica y no a la superficie real que considera la extensión de los planos inclinados.

4.7.4 Altitud

Al existir un gradiente pluviométrico, es decir uno que establece una relación entre los montos de las precipitaciones y la altitud del relieve, y se combina con la superficie de las subcuencas, se pueden estimar los montos totales de agua precipitados sobre cada subcuenca.

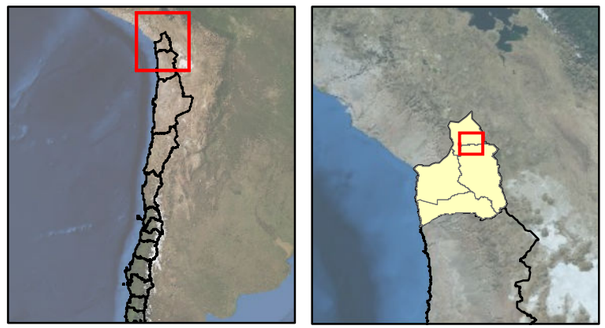
Al analizar la distribución espacial de la altitud por subcuencas, se observa que las mayores elevaciones están en los sectores sur y norte de la Cuenca de Colpitas respectivamente, alcanzado valores medios alrededor de los 5.000 m.s.n.m. (ver Figura 4-30).



Leyenda

Subcuencas Principales

- [101 - 105] Colpitas Alto
- [201 - 210] Colpitas en Borateras
- [301 - 314] Colpitas Medio
- [401 - 429] Quebrada Allanes
- [501] Colpitas Bajo
- Río Colpitas
- Quebradas
- Límite comunal



TITULO

Subcuencas Principales
Subcuencas Colpitas

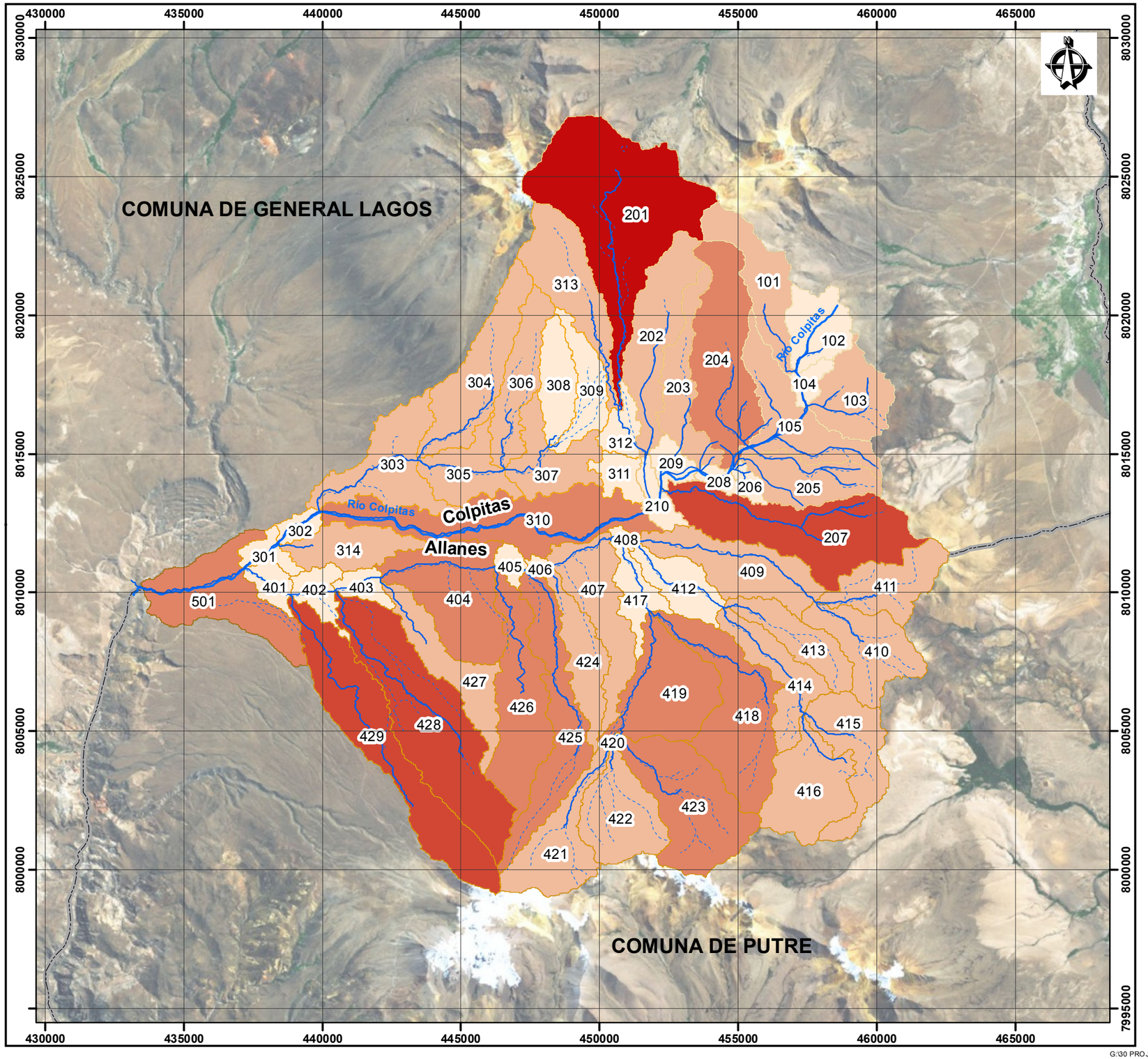
PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1: 150.000	2 1 0 2 Km	3-3

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-28.mxd



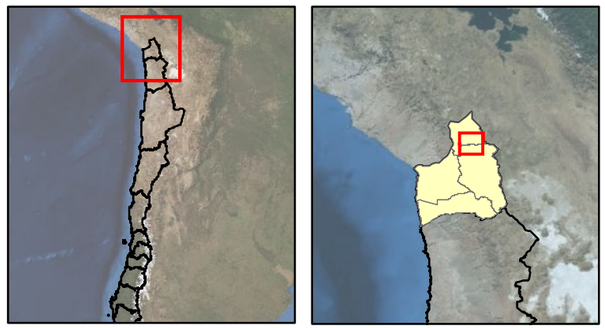
Leyenda

Superficie [Km2]

- 0,1 - 5,6
- 5,6 - 11,0
- 11,0 - 16,5
- 16,5 - 22,0
- 22,0 - 27,5

Subcuencas

- [101 - 105] Colpitas Alto
- [201 - 210] Colpitas en Borateras
- [301 - 314] Colpitas Medio
- [401 - 429] Quebrada Allanes
- [501] Colpitas Bajo
- Río Colpitas
- Quebradas
- Límite comunal



TITULO

Rangos de Tamaño por Subcuenca Colpitas

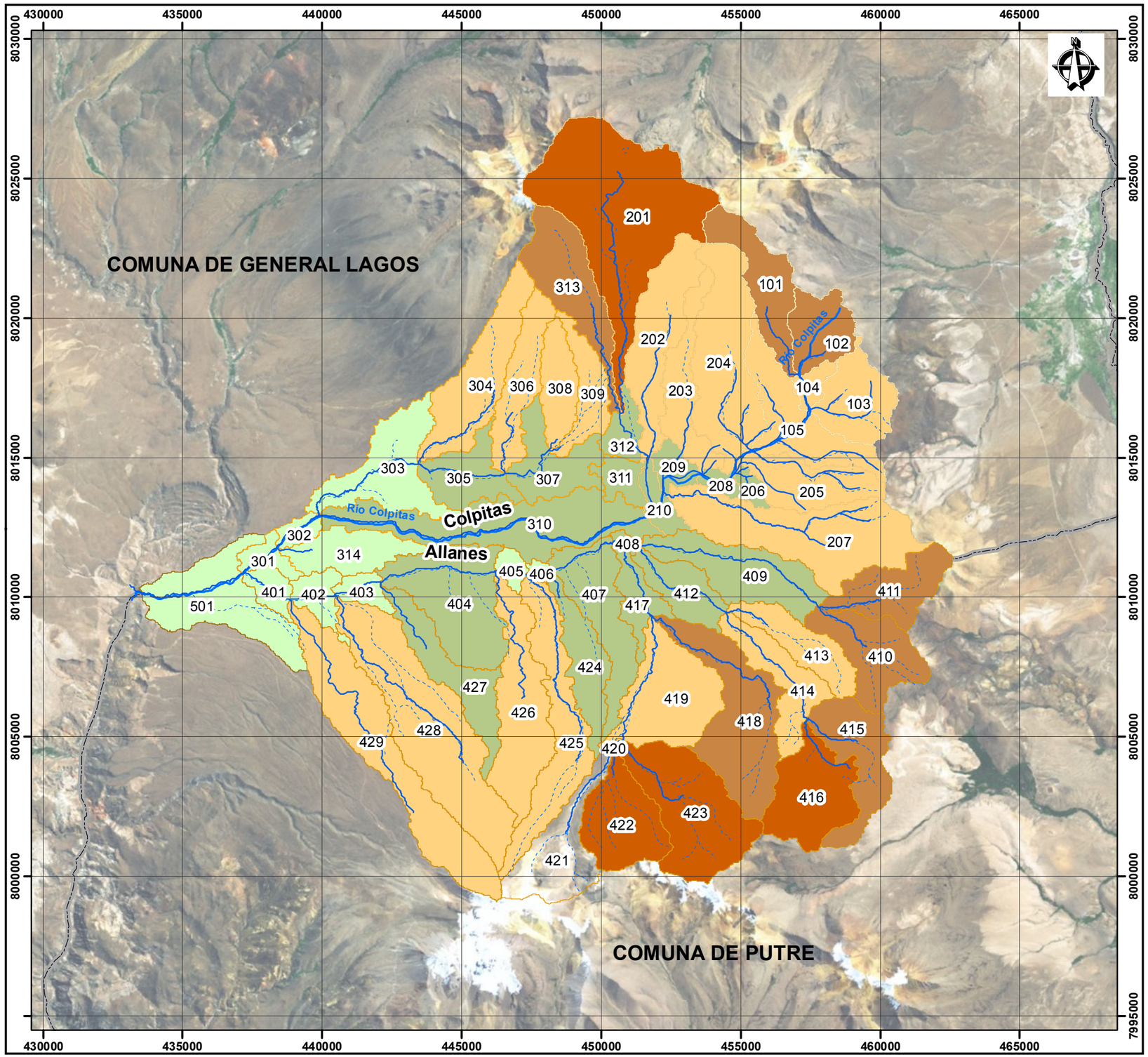
PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N° E90008	ESCALA: 1: 150.000	E. GRAFICA: 2 1 0 2 Km	FIGURA 4-29

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-29.mxd



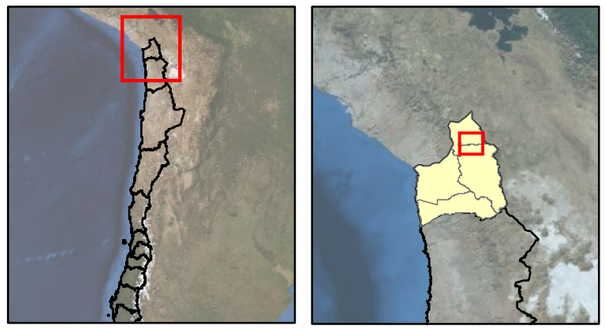
Leyenda

Altitud Media [msnm]

- 3818 - 4055
- 4055 - 4291
- 4291 - 4528
- 4528 - 4764
- 4764 - 5001

Subcuencas

- [101 - 105] Colpitas Alto
- [201 - 210] Colpitas en Borateras
- [301 - 314] Colpitas Medio
- [401 - 429] Quebrada Allanes
- [501] Colpitas Bajo
- Río Colpitas
- Quebradas
- Límite comunal



TITULO

Altitud Media por Subcuenca Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N° E90008	ESCALA: 1: 150.000	E. GRAFICA: 2 1 0 2 Km	FIGURA 4-30

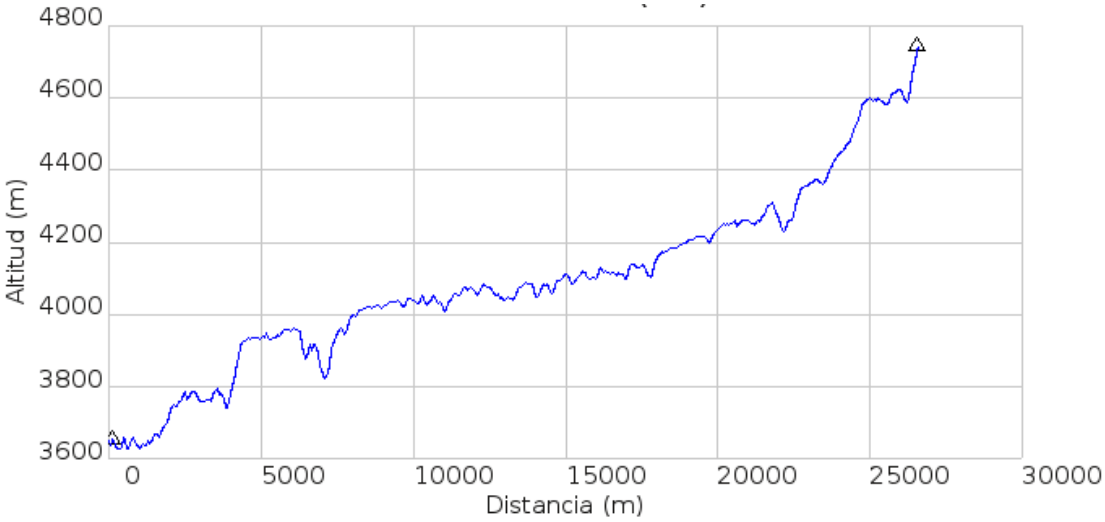
Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-30.mxd

En los siguientes perfiles topográficos se puede apreciar mejor la distribución de las altitudes en la Cuenca del río Colpitas. En el perfil A-A' orientado de Oeste a Este (ver Figura 4-31) se muestra la topografía a lo largo de un eje medido desde la subcuenca 501 a la subcuenca 411.

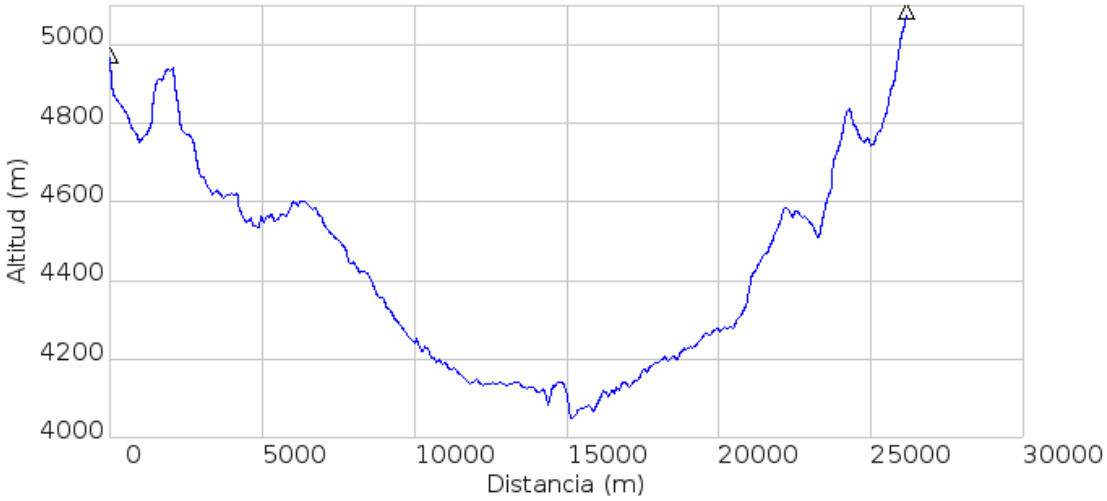
En el perfil B-B' orientado de Norte a Sur (ver Figura 4-32) que va desde la subcuenca 201 a la subcuenca 422 se observa que la topografía describe una forma de U que normalmente está asociada a la acción de las glaciaciones en su proceso de formación, a diferencia de los perfiles en V que evidencia un origen más asociado a la acción del agua.

Figura 4-31: Perfil topográfico Oeste–Este (A-A').



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-32: Perfil Topográfico Norte–Sur (B-B').

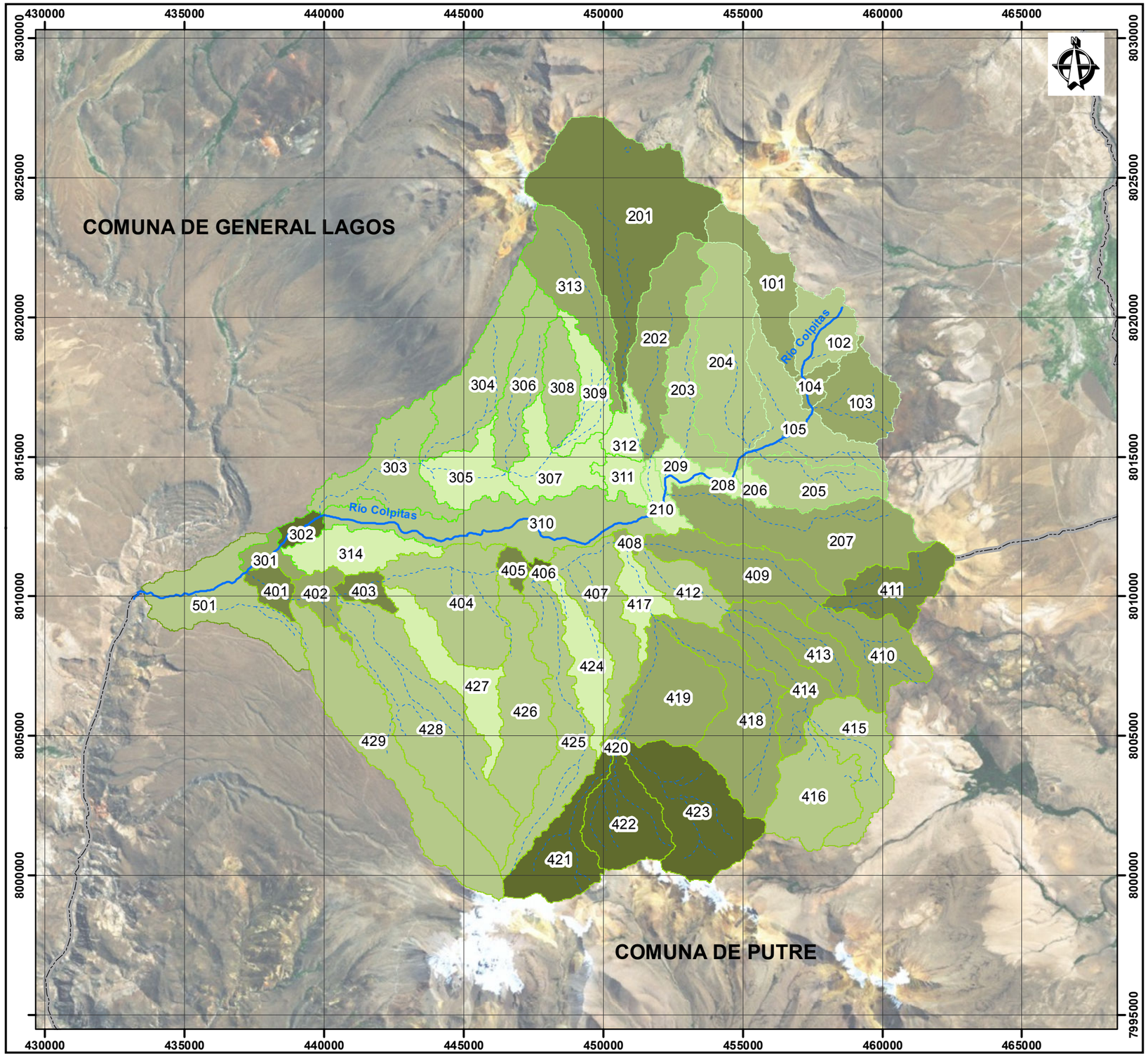


Fuente: Elaboración propia.

4.7.5 Pendiente

La pendiente es un factor importante en la caracterización morfométrica de una cuenca, puesto que explica la velocidad con la cual pueden escurrir las aguas superficiales o la mayor propensión que pueda existir para la infiltración de las mismas.

Tal como es de esperar los valores más altos de pendientes media por subcuencas se concentran preferentemente en las partes altas de la Cuenca de Colpitas, con valores que llegan hasta los 21° (ver Figura 4-33). Sin embargo, algunas subcuencas pequeñas en el curso inferior también exhiben valores altos de pendiente puesto que confluyen al cauce principal en sectores de acantilados. Los valores más bajos de pendiente media se dan en las subcuencas asociadas al sector de Borateras. El valor de pendiente media que se muestra en la Figura 4-33 corresponde a un valor ponderado de todas las pendientes dentro de cada subcuenca.



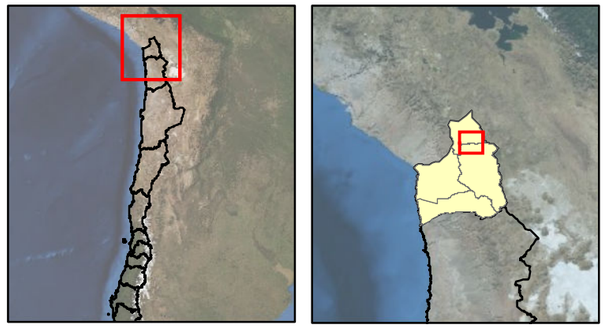
Leyenda

Pendiente Media (°)

- 5,0 - 8,2
- 8,2 - 11,5
- 11,5 - 14,7
- 14,7 - 17,9
- 17,9 - 21,2

Subcuencas

- [101 - 105] Colpitas Alto
- [201 - 210] Colpitas en Borateras
- [301 - 314] Colpitas Medio
- [401 - 429] Quebrada Allanes
- [501] Colpitas Bajo
- Río Colpitas
- Quebradas
- Límite comunal



TITULO

Pendiente Media en Grados por Subcuenca Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1: 150.000	2 1 0 2 Km	4-33

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-33.mxd

4.7.6 Índice de Compacidad de Gravelius (K_G)

Este índice establece una relación entre el perímetro y el área de una cuenca, según la siguiente fórmula:

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

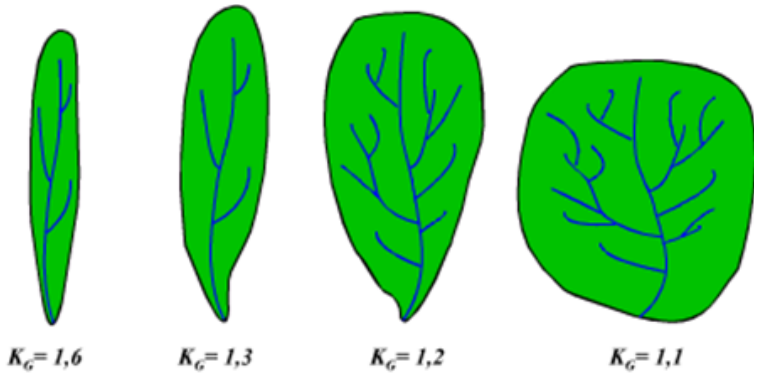
Donde,

P: Perímetro

A. Superficie

Cuando se obtienen valores cercanos a 1, se trata de cuencas que se aproximan a una circunferencia, en cambio valores que se alejan de 1 corresponden a cuencas de forma alargada (ver Figura 4-34).

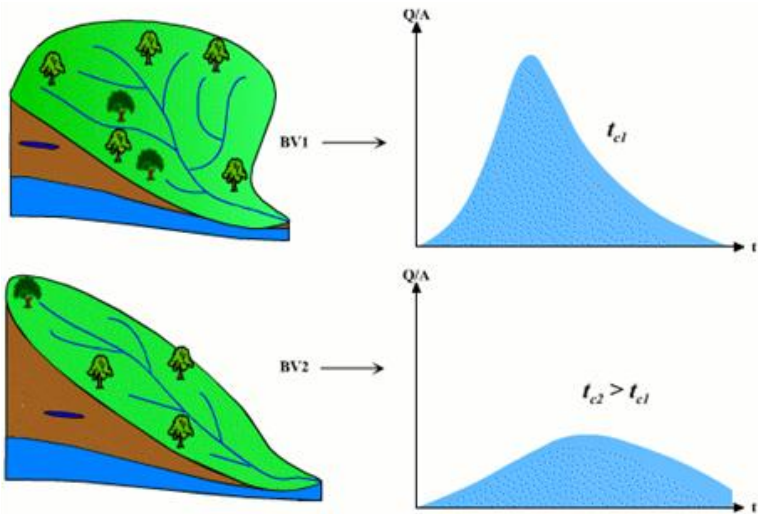
Figura 4-34: Valores típicos índice de Gravelius y forma de las cuencas.



Fuente: Musy, 2001.

La importancia de este índice radica en el hecho que existe una relación entre la forma de una cuenca y los tiempos de concentración que se reflejan en el hidrograma. Con índices cercanos a 1 se tiene la posibilidad de provocar crecidas mayores, tal como lo ilustra la Figura 4-35.

Figura 4-35: Efecto de la forma de una cuenca sobre el hidrograma.



Fuente: Musy, 2001.

Los resultados obtenidos para la Cuenca de Colpitas y sus subcuencas se pueden observar en la Figura 4-36. En general se aprecia que hacia la cabecera de la cuenca, particularmente las subcuencas 102, 103, 422, y 423 tienen una mayor compacidad y por lo tanto tienen condiciones para producir crecidas más concentradas en el tiempo. En cambio, en el curso medio de la Cuenca de Colpitas destacan subcuencas muy alargadas con un índice de Gravelius superior a 2,86, como es el caso de las subcuencas 203, 310, 425, y 427, donde el efecto de las crecidas se ve retardado como consecuencia de la geometría de las subcuencas.

COMUNA DE GENERAL LAGOS

COMUNA DE PUTRE

Río Colpitas

430000 435000 440000 445000 450000 455000 460000 465000

8030000 8025000 8020000 8015000 8010000 8005000 8000000 7995000

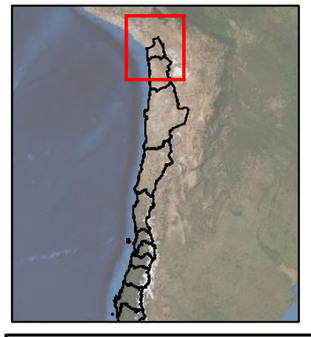
Leyenda

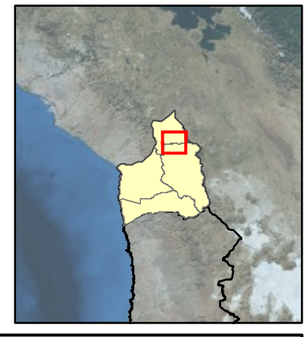
Índice Gravelius

- 1,5 - 1,8
- 1,8 - 2,1
- 2,1 - 2,5
- 2,5 - 2,8
- 2,8- 3,2

Subcuencas

- [101 - 105] Colpitas Alto
- [201 - 210] Colpitas en Borateras
- [301 - 314] Colpitas Medio
- [401 - 429] Quebrada Allanes
- [501] Colpitas Bajo
- Río Colpitas
- Quebradas
- Límite comunal





TITULO

Índice de Gravelius por Subcuenca Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N° E90008	ESCALA: 1: 150.000	E. GRAFICA: 2 1 0 2 Km	FIGURA 4-36

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-36.mxd

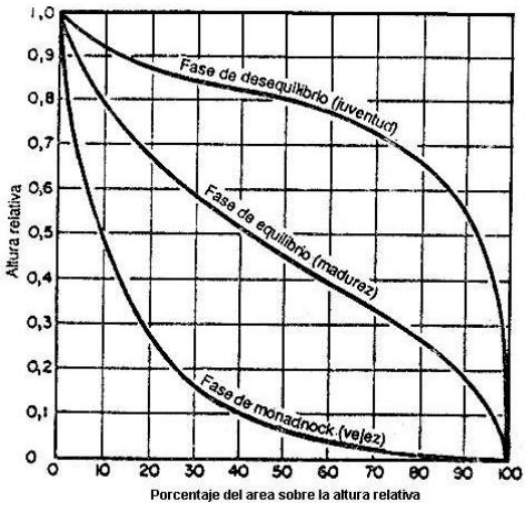
4.7.7 Curvas Hipsométricas

El relieve es un factor importante en el comportamiento de la cuenca, ya que cuanto, mayores son los desniveles en la cuenca, mayor es la velocidad de circulación y menor el tiempo de concentración, lo que implica un aumento del caudal de crecida.

Una forma de cuantificar el relieve de una cuenca es por medio de la curva hipsométrica, en la que se representa en ordenadas alturas de la cuenca, y en abscisas la superficie de la cuenca que está por encima de esa cota. Según Strahler (1952), la forma que adquiere la curva hipsométrica tiene relación con los procesos de erosión en una cuenca hidrográfica, tal como se desprende de la Figura 4-37.

Por otro lado, la curva hipsométrica puede modificarse en función de la altura relativa y ello permite estimar el estado de equilibrio dinámico potencial de la cuenca, bajo la hipótesis de que esta función relaciona altitud con área, por lo tanto, cambia con el tiempo a medida que la cuenca sufre denudación. No obstante, algunos autores atribuyen las diversas formas de la curva hipsométrica a una actividad diferencial entre los procesos de construcción tectónica y degradación por erosión, actividades no necesariamente relacionadas con la edad de la cuenca.

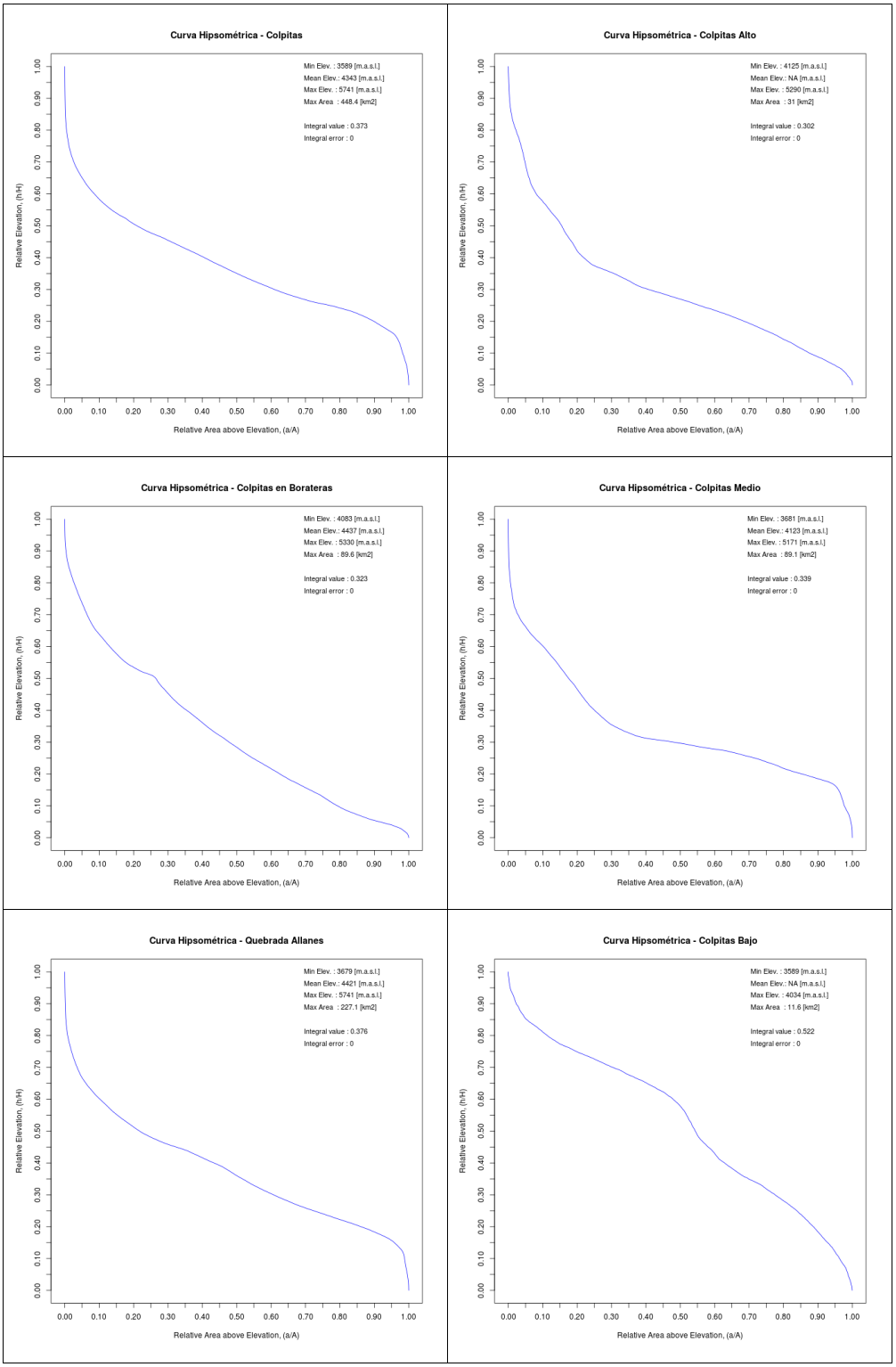
Figura 4-37: Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión.



Fuente: Strahler, 1952.

El cálculo de las curvas hipsométricas para la Cuenca de Colpitas (Figura 4-38) y cada una de las subcuencas principales se realizó a realizó a través del lenguaje estadístico R (http://www.r-project.org/) y del paquete “HydroTSM” (http://cran.r-project.org/web/packages/hydroTSM/) ejecutados desde la interfaz de RKWARD (http://rkward.sourceforge.net/).

Figura 4-38: Curvas hipsométricas de Colpitas y subcuencas principales.



Del análisis de las curvas se desprende que para la Cuenca de Colpitas en su conjunto se está en una etapa de transición desde el equilibrio hacia la vejez, lo mismo respecto de Colpitas Alto y Medio así como en Quebrada Allanes. En cambio, en Colpitas en Borateras existe un mayor equilibrio al igual que en Colpitas Bajo.

4.7.8 Resumen de Propiedades Morfométricas de Subcuencas

Además de los parámetros antes descritos para la cuenca y subcuencas, se han calculado otros parámetros complementarios para cada subcuenca. Estos son:

- Altura máxima
- Altitud mínima
- Rango de altitud (máxima – mínima)
- Pendiente máxima
- Pendiente mínima
- Rango de pendiente (máxima – mínima)

La Tabla 4-51 muestra cada uno de estos parámetros para cada subcuenca.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Tabla 4-51: Propiedades morfométricas subcuencas en Colpitas.

Subcuenca	Área	Perímetro	Ind. Gravelius	DEM_min	DEM_max	DEM_range	DEM_mean	PEND_min	PEND_max	PEND_range	PEND_mean
101	7.61	22.88	2.30	4283.00	5290.00	1007.00	4747.39	0.00	48.68	48.68	14.66
102	5.50	14.22	1.70	4279.00	4831.00	552.00	4528.51	0.00	31.37	31.37	10.08
103	6.96	16.49	1.80	4200.00	4581.00	381.00	4404.33	0.00	34.21	34.21	11.69
104	1.46	8.54	2.00	4198.00	4495.00	297.00	4343.48	0.48	37.60	37.12	12.11
105	9.45	29.51	2.70	4125.00	4680.00	555.00	4302.61	0.00	34.79	34.79	10.12
201	27.53	41.64	2.20	4209.00	5330.00	1121.00	4764.96	0.00	59.33	59.33	17.08
202	10.44	29.33	2.60	4123.00	5246.00	1123.00	4486.29	0.00	48.92	48.92	13.52
203	6.36	27.66	3.10	4114.00	5057.00	943.00	4334.97	0.00	42.89	42.89	9.47
204	14.70	30.41	2.20	4120.00	5276.00	1156.00	4427.42	0.00	53.72	53.72	10.52
205	6.59	17.09	1.90	4129.00	4684.00	555.00	4306.39	0.00	36.83	36.83	10.97
206	1.08	6.57	1.80	4119.00	4245.00	126.00	4165.82	0.34	21.63	21.29	7.09
207	17.60	34.53	2.30	4090.00	4959.00	869.00	4348.64	0.00	45.64	45.64	12.44
208	1.10	6.93	1.90	4112.00	4205.00	93.00	4142.79	0.34	22.96	22.62	6.43
209	2.05	8.90	1.80	4089.00	4184.00	95.00	4133.40	0.00	21.95	21.95	5.92
210	2.18	11.05	2.10	4083.00	4188.00	105.00	4122.14	0.00	21.22	21.22	5.69
301	1.85	10.69	2.20	3681.00	3956.00	275.00	3818.56	0.00	50.00	50.00	13.19
302	1.42	7.05	1.70	3757.00	3963.00	206.00	3876.02	0.34	58.20	57.86	20.52
303	10.05	28.14	2.50	3788.00	4223.00	435.00	4004.79	0.00	61.62	61.62	8.91
304	10.71	26.35	2.30	3956.00	4873.00	917.00	4312.06	0.00	41.83	41.83	9.58
305	5.76	18.88	2.20	3951.00	4171.00	220.00	4063.70	0.00	37.54	37.54	7.98
306	6.88	22.76	2.40	4040.00	4730.00	690.00	4307.59	0.00	30.78	30.78	8.50
307	6.52	23.12	2.60	4045.00	4281.00	236.00	4129.71	0.00	34.15	34.15	5.98
308	4.76	15.23	2.00	4109.00	4629.00	520.00	4300.43	0.00	26.74	26.74	8.95
309	4.66	19.72	2.60	4110.00	4657.00	547.00	4298.02	0.00	23.74	23.74	7.39
310	16.31	43.73	3.10	3789.00	4158.00	369.00	4061.53	0.00	61.52	61.52	11.35
311	2.33	11.65	2.20	4079.00	4169.00	90.00	4134.03	0.00	18.96	18.96	5.05
312	2.42	11.35	2.10	4122.00	4293.00	171.00	4183.61	0.00	19.53	19.53	6.24
313	9.52	26.23	2.40	4206.00	5171.00	965.00	4628.61	0.00	47.31	47.31	13.75
314	5.91	20.25	2.40	3771.00	4047.00	276.00	3971.77	0.00	40.87	40.87	5.42
401	2.04	8.96	1.80	3679.00	3948.00	269.00	3825.81	0.00	59.12	59.12	15.22
402	2.68	13.44	2.30	3752.00	4030.00	278.00	3925.24	0.00	66.12	66.12	12.99
403	1.87	8.84	1.80	3795.00	4045.00	250.00	3944.60	0.34	56.87	56.53	17.47
404	12.59	24.67	2.00	3833.00	4232.00	399.00	4069.70	0.00	59.58	59.58	10.30
405	1.24	6.09	1.50	3934.00	4122.00	188.00	4050.49	0.00	53.55	53.55	15.14
406	0.52	4.18	1.60	3956.00	4118.00	162.00	4041.55	1.02	44.83	43.82	19.43
407	9.09	28.08	2.60	3973.00	4467.00	494.00	4162.85	0.00	45.58	45.58	8.60
408	0.52	4.72	1.80	4036.00	4153.00	117.00	4091.04	0.34	42.43	42.09	13.41
409	9.86	24.79	2.20	4056.00	4493.00	437.00	4251.22	0.00	38.24	38.24	11.53
410	8.18	19.78	2.00	4299.00	4834.00	535.00	4548.35	0.34	39.50	39.16	13.11
411	7.00	19.24	2.10	4300.00	4984.00	684.00	4601.01	0.34	48.20	47.86	17.12
412	4.92	15.12	1.90	4058.00	4328.00	270.00	4182.30	0.00	45.44	45.44	9.34
413	5.79	18.28	2.10	4170.00	4710.00	540.00	4451.53	0.34	44.96	44.62	12.95
414	6.91	23.06	2.50	4170.00	4727.00	557.00	4453.89	0.00	45.69	45.69	12.36
415	8.03	24.67	2.50	4472.00	4936.00	464.00	4638.00	0.00	32.83	32.83	8.36
416	9.60	20.91	1.90	4474.00	5242.00	768.00	4768.32	0.34	33.72	33.39	11.07
417	3.54	17.68	2.70	4034.00	4264.00	230.00	4146.29	0.00	31.31	31.31	7.76
418	14.27	31.37	2.30	4152.00	5243.00	1091.00	4592.65	0.00	45.98	45.98	12.49
419	11.35	22.70	1.90	4147.00	5068.00	921.00	4455.76	0.00	43.02	43.02	13.49
420	0.12	2.33	1.90	4386.00	4472.00	86.00	4418.32	0.96	22.81	21.85	10.37
421	8.45	23.42	2.30	4399.00	5740.00	1341.00	5001.01	0.00	56.67	56.67	21.21
422	8.62	17.27	1.70	4400.00	5359.00	959.00	4837.74	0.48	49.28	48.80	18.69
423	13.93	23.90	1.80	4385.00	5428.00	1043.00	4869.72	0.34	52.86	52.52	18.35
424	5.95	22.82	2.60	3975.00	4527.00	552.00	4244.69	0.00	32.77	32.77	7.44
425	11.83	39.25	3.20	3960.00	5527.00	1567.00	4480.52	0.00	40.53	40.53	11.04
426	12.07	31.84	2.60	3936.00	5005.00	1069.00	4398.14	0.00	38.83	38.83	9.77
427	7.42	28.26	2.90	3840.00	4602.00	762.00	4209.11	0.00	43.36	43.36	6.87
428	21.07	38.48	2.40	3799.00	5432.00	1633.00	4379.84	0.00	45.58	45.58	10.13
429	17.64	40.93	2.70	3752.00	5741.00	1989.00	4424.19	0.00	57.66	57.66	11.42
501	11.59	27.30	2.30	3589.00	4034.00	445.00	3821.73	0.00	52.21	52.21	11.42

4.7.9 Red de Drenaje

Respecto de la red drenaje se han calculado los siguientes parámetros principales:

- Jerarquización
- Densidad de drenaje
- Perfil Longitudinal
- Pendiente media de cauce principal

Se debe señalar que la red de drenaje obtenida automáticamente a partir del Modelo Digital de Terreno, tuvo que ser complementada y perfeccionada por interpretación visual de la imagen Landsat 8, particularmente en el sector de Borateras.

4.7.10 Jerarquización de la Red de Drenaje Superficial

Las propiedades lineales de la red de drenaje permiten deducir en una primera instancia la interacción entre el sistema fluvial y las demás características ambientales del territorio de la cuenca, tales como geología y estructura geológica, energía del relieve y pendiente, suelos dominantes e impermeabilidad, vegetación dominante y uso del suelo.

La jerarquización pretende subdividir los distintos cursos de agua que integran la red de drenaje superficial en segmentos de cauce clasificados en función del orden de magnitud de los mismos.

El análisis cuantitativo de redes hidrográficas se basa en el método de Horton (1945) de clasificación de la red de canales y que posteriormente fue perfeccionado por Strahler (1952), siendo el esquema de clasificación más utilizado en hidrología.

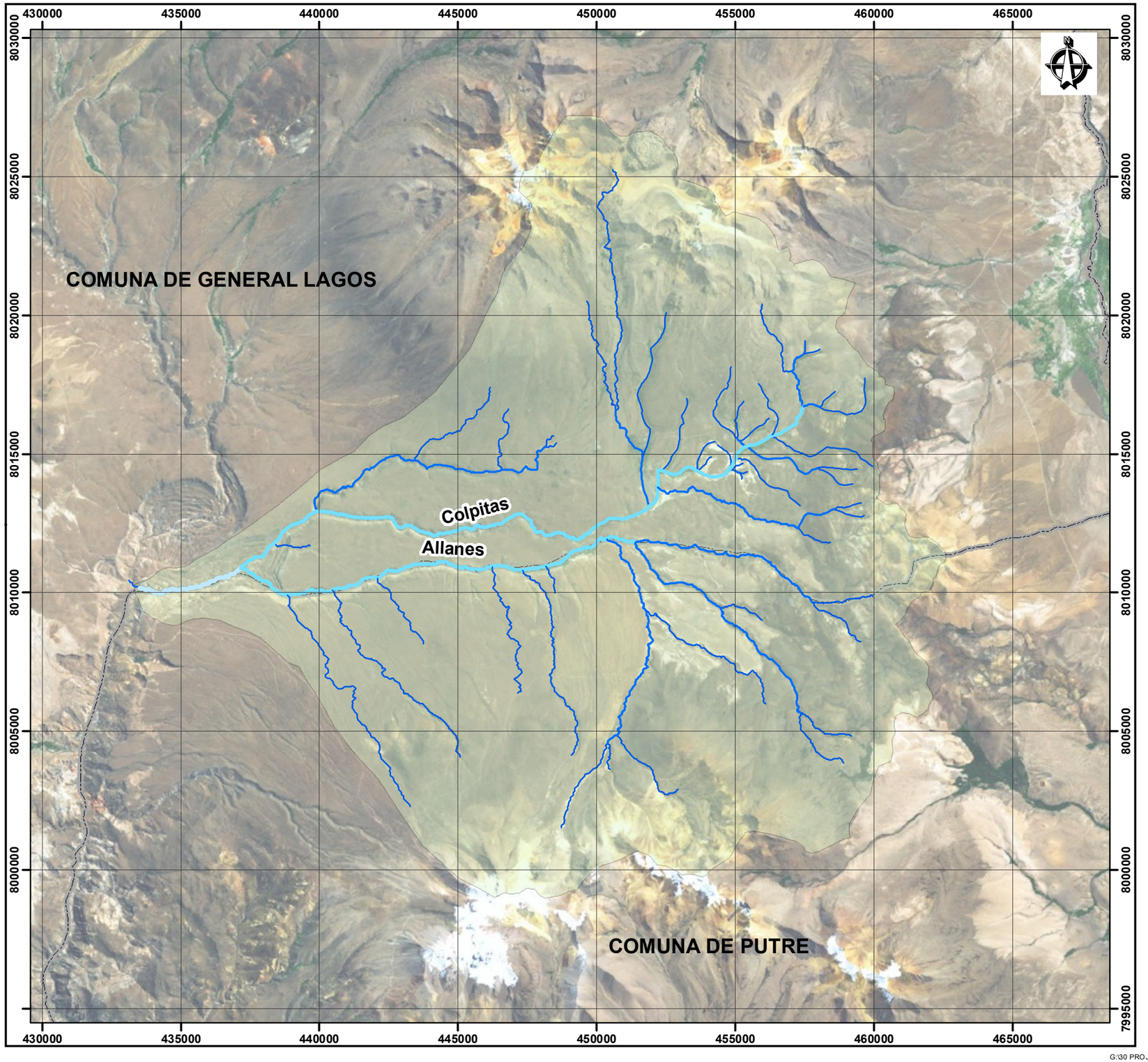
Las redes de drenaje pueden ser modeladas o representadas como árboles, los cuales están conformados por un conjunto de nodos conectados unos a otros por segmentos de recta de manera que cada nodo tiene solo una ruta hacia la salida. Según Strahler (1952) una corriente puede tener uno o más segmentos. Un canal es una unión arbitraria de segmentos (ejemplo: canal principal).

Para jerarquizar una red de drenaje se asignan valores numéricos a los órdenes de la siguiente manera:

- Todos los cursos de agua en sus nacientes se les asigna el valor 1,
- La conjunción de dos cauces de orden 1, implica que la red de drenaje aumenta de magnitud por lo que a partir del lugar de confluencia se le asigna el valor 2,

- Cada vez que confluyen dos cauces de una misma jerarquía se origina un nuevo cauce de jerarquía inmediatamente superior.

Así se procede sucesivamente hasta finalizar con la jerarquización de la red de drenaje. El encuentro de un curso de orden inferior con otro de magnitud superior no significa cambio de orden de magnitud en la red de drenaje. Por ejemplo la confluencia de un curso de orden 1 con otro de orden 3 no varía la magnitud. La misma continúa siendo de 3. Sólo aumenta si se produce la confluencia entre dos cursos de agua de idéntica magnitud. El curso de agua cuyo cauce alcanza la máxima magnitud dentro del área ocupada por la cuenca, es el río principal (Figura 4-39).



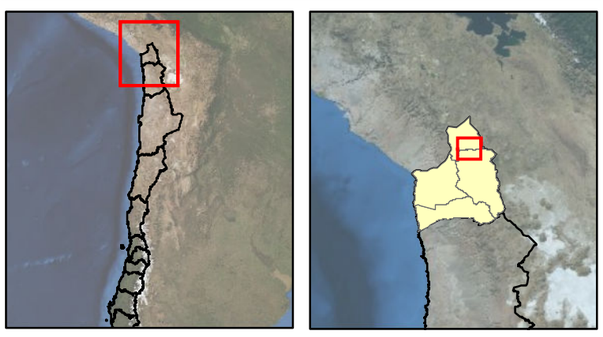
Leyenda

Red Hídrica Cuenca Río Colpitas

Jerarquia

- 1
- 2
- 3
- 4

Límite comunal



TITULO

Jerarquía Red de Drenaje
Cuenca Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1: 150.000	2 1 0 2 Km	4-39

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-39.mxd

4.7.11 Densidad de la Red de Drenaje

Horton (1945) definió la densidad de drenaje de una cuenca como el cociente entre la longitud total de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca, expresados en kilómetros y el área total de la cuenca expresada en kilómetros cuadrados.

$$D = L / A$$

Donde,

D: Densidad de drenaje

L: Sumatoria de longitudes de cauce en km

A: Superficie de cuenca en km^2

Debiéndose interpretar el resultado como el número de cauces existentes por km^2. La densidad de drenaje expresa las características geoecológicas del territorio de la cuenca. Los factores que controlan la densidad de drenaje son:

- Litología del Sustrato,
- Permeabilidad del Suelo y capacidad de infiltración,
- Cobertura vegetal y tipo de la misma.

"*Los materiales geológicos duros y resistentes tales como el granito, gneiss, arenisca y cuarcitas, tienden a originar bajas densidades de drenaje. Esto es debido a que la erosión fluvial es difícil. En materiales blandos, tales como margas y arcillas, las cuencas por pequeñas que sean, pueden suministrar la escorrentía suficiente como para erosionar el cauce. Los materiales muy permeables, como las arenas o las gravas tienden a originar bajas densidades de drenaje, dado que la infiltración es grande*" (Strahler, 1986).

"*Una roca débil producirá mucha menos densidad de drenaje en un clima húmedo, donde una espesa cobertura vegetal protege el material subyacente que en una región árida, donde no existe dicha cobertura*" (Strahler, 1986).

De modo general, la densidad de drenaje está gobernada por la densidad de la cubierta vegetal, la topografía y el tipo de suelo, entre otros factores. El valor de la Densidad de drenaje puede variar de menos de 10 en áreas con predominio del escurrimiento subterráneo sobre el superficial, ejemplo: terrenos kársticos o de arena suelta y densa cubierta vegetal, a más de 100 en terrenos arcillosos impermeables (badlands) sin vegetación (Chorley et al., 1969).

Los valores de densidad de drenaje obtenidos para la Cuenca de Colpitas son muy bajos (ver Tabla 4-52), lo cual puede estar relacionado con los niveles de permeabilidad de la roca y los montos de precipitaciones. En todo caso se observan ligeras diferencias entre las subcuencas principales, siendo las de mayor densidad de drenaje las de Colpitas Alto y Colpitas en Borateras, esta observación se basa en los valores numéricos de la siguiente tabla, como de la interpretación visual de la Figura 4-39.

Tabla 4-52: Densidad de drenaje por subcuencas principales.

Subcuenca Principal	Suma Longitud Cauces (km)	Superficie Subcuenca (km^2)	Densidad Drenaje (km/km^2)
Colpitas Alto	21,73	30,97	0,7
Colpitas en Borateras	57,88	89,64	0,65
Colpitas Medio	45,88	89,09	0,51
Quebrada Allanes	110,55	227,1	0,49
Colpitas Bajo	4,34	11,59	0,37

4.7.12 Perfiles Longitudinales

Los perfiles longitudinales de los distintos cauces principales de las distintas subcuencas fueron obtenidos a partir del Modelo Digital de Terreno AsterDEM V2 y de los cauces extraídos del mismo modelo. Los datos se procesaron a través de QGIS (www.qgis.org) y graficados con Gnuplot (www.gnuplot.info).

En los perfiles se representa en rojo la altura obtenida a partir de AsterDEM y en azul una curva con un ajuste polinomial de cuarto grado que muestra la tendencia del perfil longitudinal (Figura 4-40). Se hizo necesario realizar este ajuste, puesto que en muchos casos el cauce de las quebradas es más angosto que la resolución espacial que tiene AsterDEM de 30 m. y por lo tanto los cauces aparecen como si estuviesen montados sobre las laderas. Esto explica la aparente anomalía que el perfil tiene en cuanto a los “altos” y “bajos” que se observan en la curva en rojo. Los distintos gráficos no son directamente comparables entre sí, puesto que las escalas verticales y horizontales son distintas entre sí, debido a la longitud diversa de los cauces y de los desniveles del terreno en cada caso.

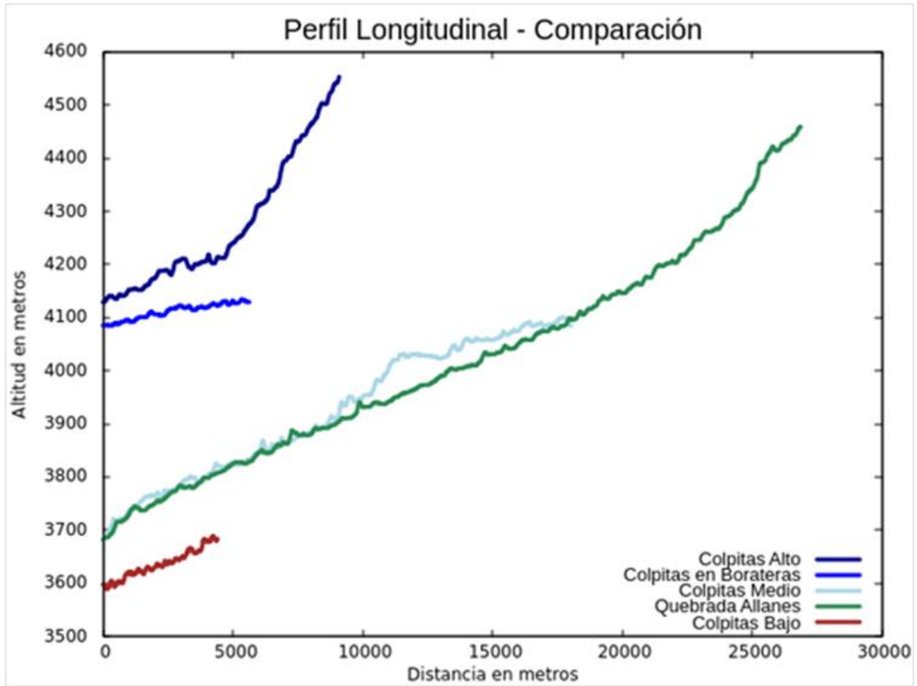
En el eje X se representan la longitud de los cauces medidas desde el punto más bajo de cada uno de ellos y en Y se representa la altitud. Al examinar los gráficos con los perfiles se observa que en el caso de Colpitas Alto existe un cambio importante en la pendiente, la cual se produce alrededor de los 4.900 m (distancia medida desde el

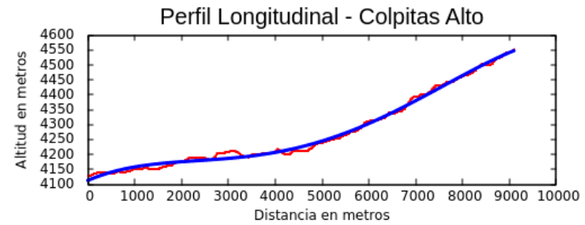
origen). En cambio en el resto de los perfiles se mantiene una pendiente relativamente constante a lo largo del cauce.

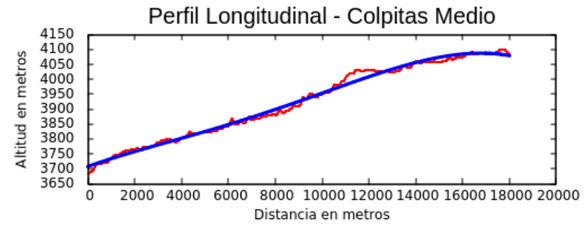
Para una comparación de todos los perfiles longitudinales debe examinarse la Figura 4-40 donde se muestran todos los perfiles sobre un mismo gráfico y se puede comparar la longitud de cada perfil, las diferencias de altura y por ende la pendiente media de cada perfil.

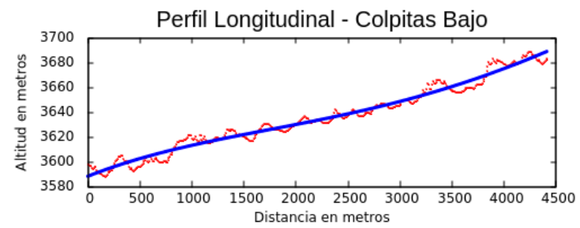
Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

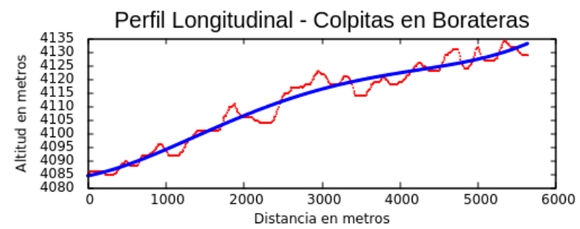
Figura 4-40: Comparación entre perfiles longitudinales de cauces principales en subcuencas principales.

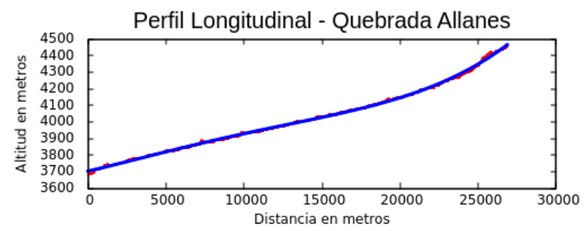












4.7.13 Pendiente Media de Cauces Principales

En la Tabla 4-53 se muestra un resumen de los datos de los perfiles. Se aprecia que en general la pendiente media de los cauces disminuye hacia las partes más bajas de la cuenca, con la excepción del sector de Colpitas en Borateras donde se produce el mínimo de pendiente media.

Tabla 4-53: Desnivel y pendiente media de cauces en subcuencas principales.

Cauce	Longitud Cauce (m)	Diferencia Altitud (m)	Pendiente (º)	Pendiente (%)
Colpitas Alto (entre 4.890 – 9.120)	4.230	310	4.19	7.32
Colpitas Alto (entre 0 – 4.890)	4.890	130	1.52	2.65
Colpitas en Borateras	5.600	47	0.48	0.84
Colpitas Medio	17.832	422	1.35	2.36
Quebrada Allanes	26.797	794	1.69	2.96
Colpitas Bajo	4.453	100	1.28	2.24

4.7.14 Análisis Multiespectral de la Imagen LANDSAT 8

4.7.15 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y Falso Color Compuesto (5, 4, 3)

Este índice permite evaluar el estado de vigor de la vegetación y se realiza en función de la combinación de las bandas espectrales del infrarrojo cercano (0,85-0,88 µm) y rojo visible (0,64–0,67 µm). Esto se basa en el hecho que las plantas absorben radiación solar principalmente en la región del rojo visible, la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis y en contraste reflejan fuertemente la energía recibida en el rango del infrarrojo cercano, puesto que de otro modo se produciría un sobrecalentamiento de la planta y la consecuente destrucción de sus tejidos. Entonces una diferencia normalizada entre estas dos bandas permite destacar claramente la presencia de vegetación.

El NDVI se expresa como sigue:

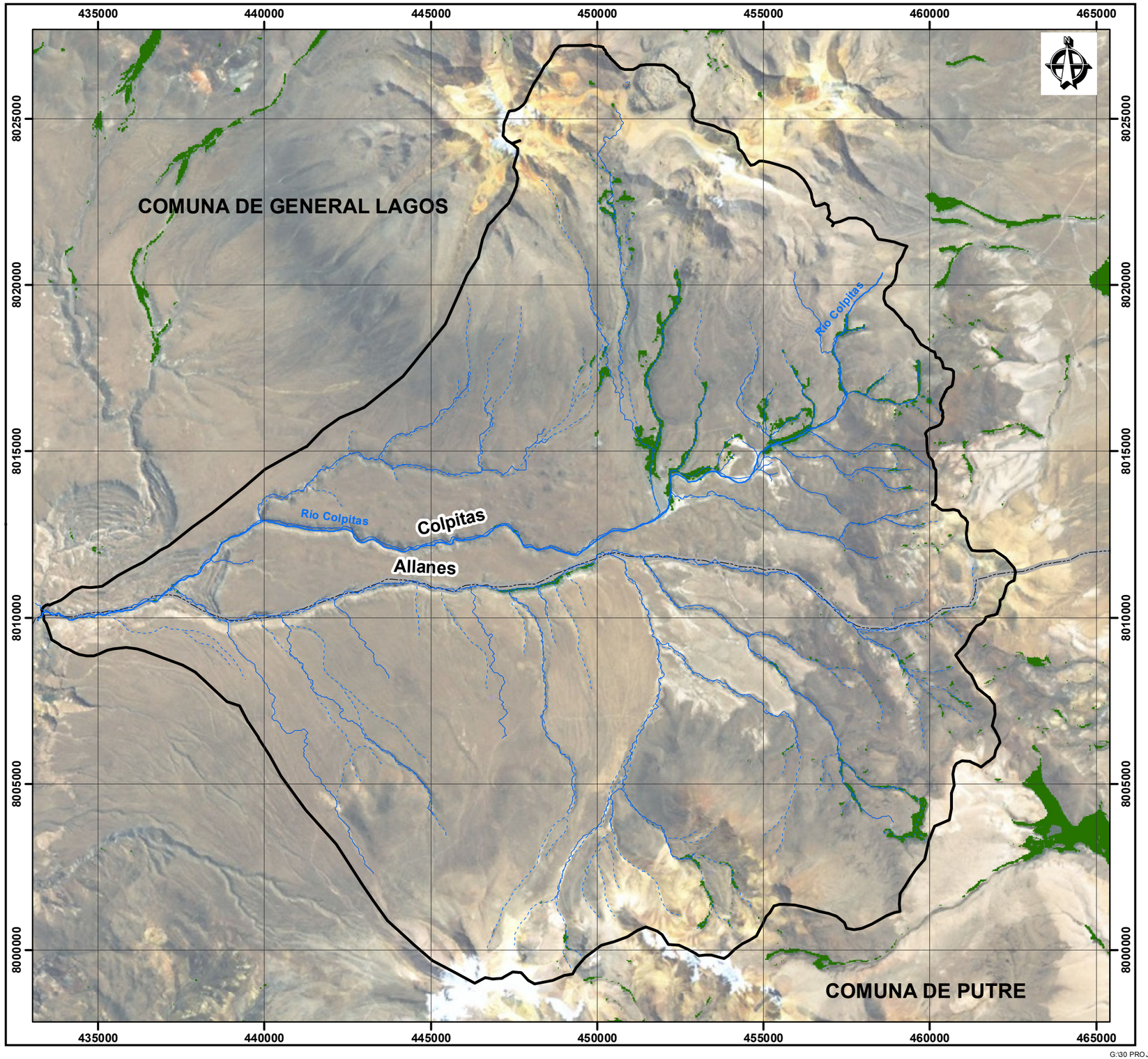
Banda Infrarrojo – Banda Rojo / Banda Infrarrojo + Banda Rojo

En teoría los valores que se obtienen de este índice son en el rango de -1 a 1. Donde típicamente valores sobre 0,1 indican presencia de vegetación, sin embargo la determinación de este valor siempre requiere comprobación de campo. También es

importante tener presente que la capacidad de detección de la vegetación está relacionada con la resolución espacial de las imágenes, puesto que la respuesta espectral de un pixel es un promedio de todos los elementos que se encuentran al interior de un pixel. En el caso de Landsat 8, con una resolución de 30 x 30 m, la vegetación dispersa no logra ser identificada.

En el caso de la Cuenca de Colpitas los resultados obtenidos (ver Figura 4-41) muestran que la vegetación se concentra esencialmente a lo largo de las quebradas en el sector nororiente de la cuenca, puesto que el resto de la vegetación dispersa no alcanza a ser detectada por la resolución espacial de la imagen. Para este caso el umbral de corte del NDVI se fijó en 0,11.

En forma complementaria al NDVI se puede hacer una composición de imágenes en Falso Color Compuesto. Normalmente se puede visualizar una imagen en color natural (tal como lo vemos a simple vista), combinando las bandas azul, verde y rojo a través de los respectivos canales. Si se cambia la combinación de bandas, entonces se habla de Falso Color Compuesto, puesto que se logra generar una imagen de color, pero que no son los colores naturales. Esta técnica permite destacar elementos que a simple vista son difíciles de observar. Para destacar la vegetación se reemplaza la banda azul por la infrarroja cercana, aprovechando el hecho que en el infrarrojo la vegetación tiene una alta reflectancia. En el caso de Landsat 8 la combinación utilizada es banda3, banda4, banda5 por los canales azul, verde y rojo respectivamente. En estas imágenes la vegetación aparece en color rojo (ver Figura 4-42). Las áreas que aparecen en rojo coinciden con las identificadas como vegetación a través del NDVI.



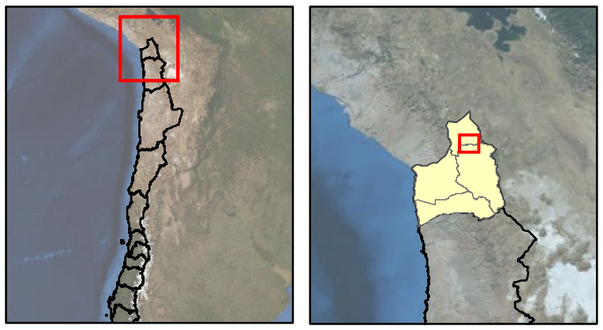
Leyenda

- Río Colpitas
- Quebradas
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal

Este Índice NDVI se calcula a partir de las bandas Infrarroja Cercana y Roja, 5 y 4 respectivamente, para las imágenes Landsat 8.

NDVI= (B5 - B4) / (B5 + B4)

En verde aparece la vegetación correspondiente a sectores con NDVI >0.11



TITULO

Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación Cuenca Colpitas

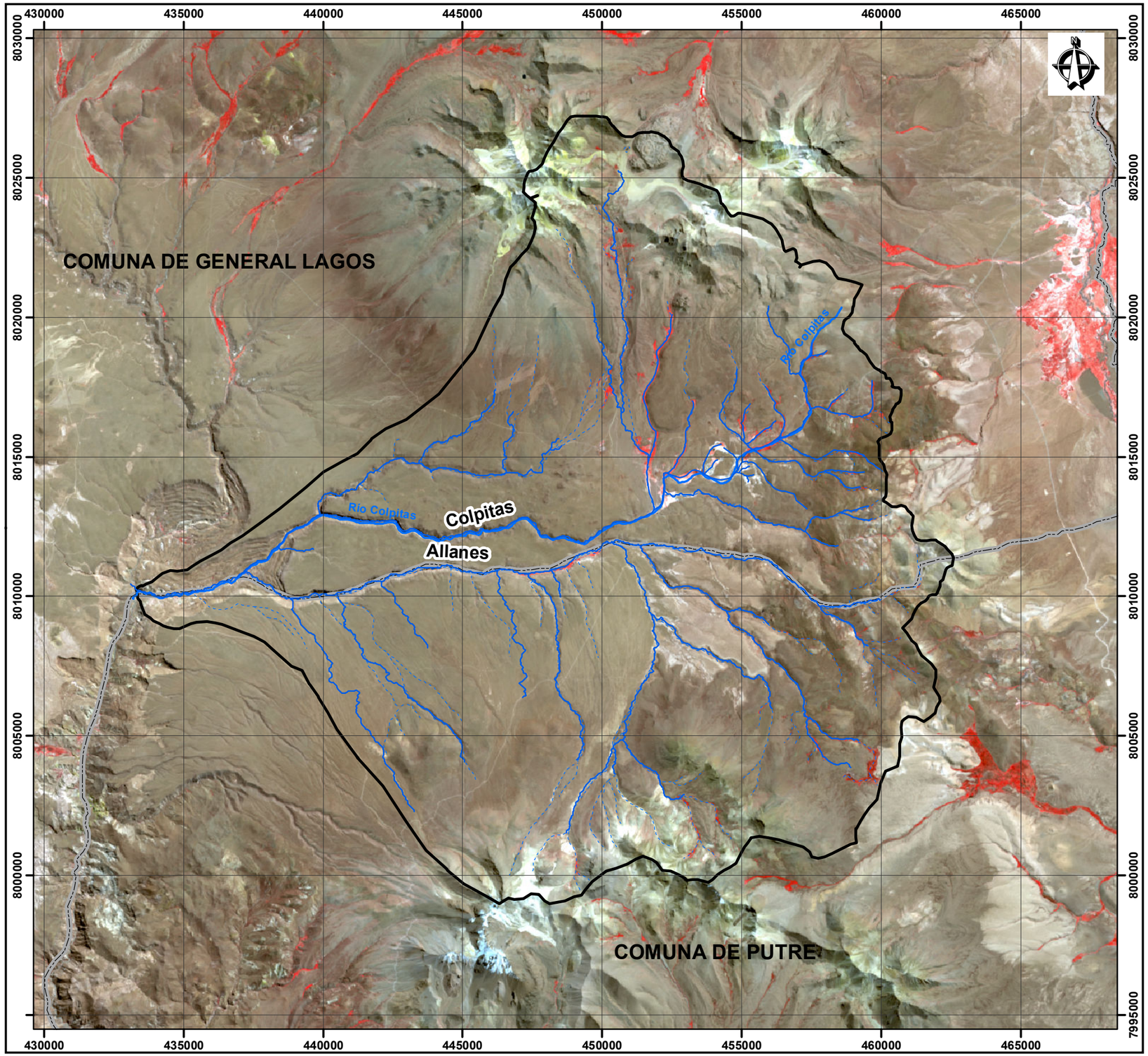
PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1: 150.000	2 1 0 2 Km	4-41

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

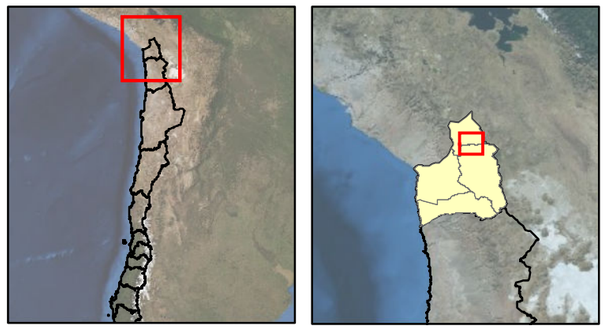
G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-41.mxd



Leyenda

- Río Colpitas
- Quebradas
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal

Falso Color Compuesto de Bandas 5,4 y 3 de imagen Landsat 8 del 26 de Abril de 2013. En rojo destaca la vegetación.



TITULO

Falso Color Compuesto Cuenca Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N° E90008	ESCALA: 1: 150.000	E. GRAFICA: 2 1 0 2 Km	FIGURA 4-42

Fuente:Información DGA. Imagen Landsat 8, 543, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-42.mxd

4.7.16 Análisis de Componentes Principales

Las imágenes satelitales multiespectrales, como es el caso de las imágenes Landsat 8 tienen un alto nivel de correlación entre las distintas bandas en que se divide el espectro electromagnético. Con el objetivo de aprovechar al máximo el contenido de información de cada banda espectral, se realiza un Análisis de Componentes Principales (PCA), que consiste en transformar un conjunto grande de datos altamente correlacionados, en un conjunto reducido de datos no correlacionados. Es decir, mediante un procedimiento estadístico se extraen los datos no correlacionados entre sí y se agrupan en componentes principales. Típicamente el primer componente explica más del 75% de toda la varianza en una imagen, el segundo componente entre un 10% y 20% y el tercer componente entre 1% y 5% (Figura 4-43).

En el caso particular de la imagen del 26 de abril, 2013 utilizada para este estudio los valores para los distintos componentes son (Tabla 4-54):

Tabla 4-54: Varianza explicada y acumulada por componentes principales. PCA realizado con bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, y 8 de imagen Landsat 8 del 26 de abril, 2013.

Componente	Varianza Explicada (%)	Varianza Acumulada (%)
1	83,92	83,92
2	8,55	92,47
3	5,11	97,58
4	1,16	98,74
5	0,73	99,47
6	0,48	99,95
7	0,04	99,99
8	0,01	100

Para este caso, con los tres primeros componentes se explica más del 97% de toda la varianza de la imagen.

Esta técnica de análisis es particularmente útil en el caso de clasificaciones espectrales no supervisadas, esto es un tipo de clasificación donde no se definen a priori por el usuario, sino que resultan del análisis estadístico de las imágenes. De esta manera, se puede reconocer una diferenciación espacial en el territorio y establecer los programas de muestreo o monitoreo que permitan establecer las características de las unidades que a nivel espectral fueron discriminadas, pero sin saber “a priori” cuál es su composición y características.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

435000 440000 445000 450000 455000 460000 465000

8025000 8020000 8015000 8010000 8005000 8000000

COMUNA DE GENERAL LAGOS

COMUNA DE PUTRE

Río Colpitas

Río Colpitas

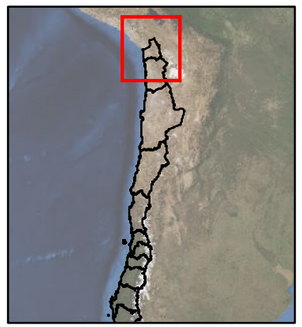
Río Colpitas

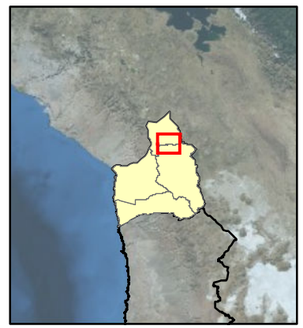
Colpitas

Allanes

Leyenda

- Río Colpitas
- Quebradas
- Cuenca Río Colpitas
- Límite comunal





TITULO

Análisis de Componentes Principales
Cuenca Río Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N°	ESCALA:	E. GRAFICA:	FIGURA
E90008	1: 150.000	2 1 0 2 Km	4-43

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-43.mxd

4.7.17 Análisis de Clúster

Existen diversas técnica de agrupamiento (clustering) de datos que son utilizadas para la clasificación no supervisadas de imágenes, una de ellas es “K Means” y fue la utilizada en este caso. Este método analiza el conjunto de la imagen y determina la ubicación inicial de los centros de cada clase. En cada proceso de iteración cada celda (pixel) es asignada al centro de clase más próximo (en términos espectrales) y se recalculan nuevas ubicaciones para los centros. El nuevo centro de clase es el que minimiza el cuadrado de la distancia entre las celdas y el centro de clase. Este proceso se repite hasta que se estabiliza la ubicación del centro de clase. Este método presupone la definición inicial de clases a identificar y también se debe especificar el número de iteraciones a realizar.

Para el caso de Colpitas se aplicó esta técnica de agrupamiento a la imagen que combina los tres componentes principales mostrados anteriormente y se definió un total de 12 clases con un total de 10 iteraciones. El procesamiento se realizó con el software TNTMIPS.

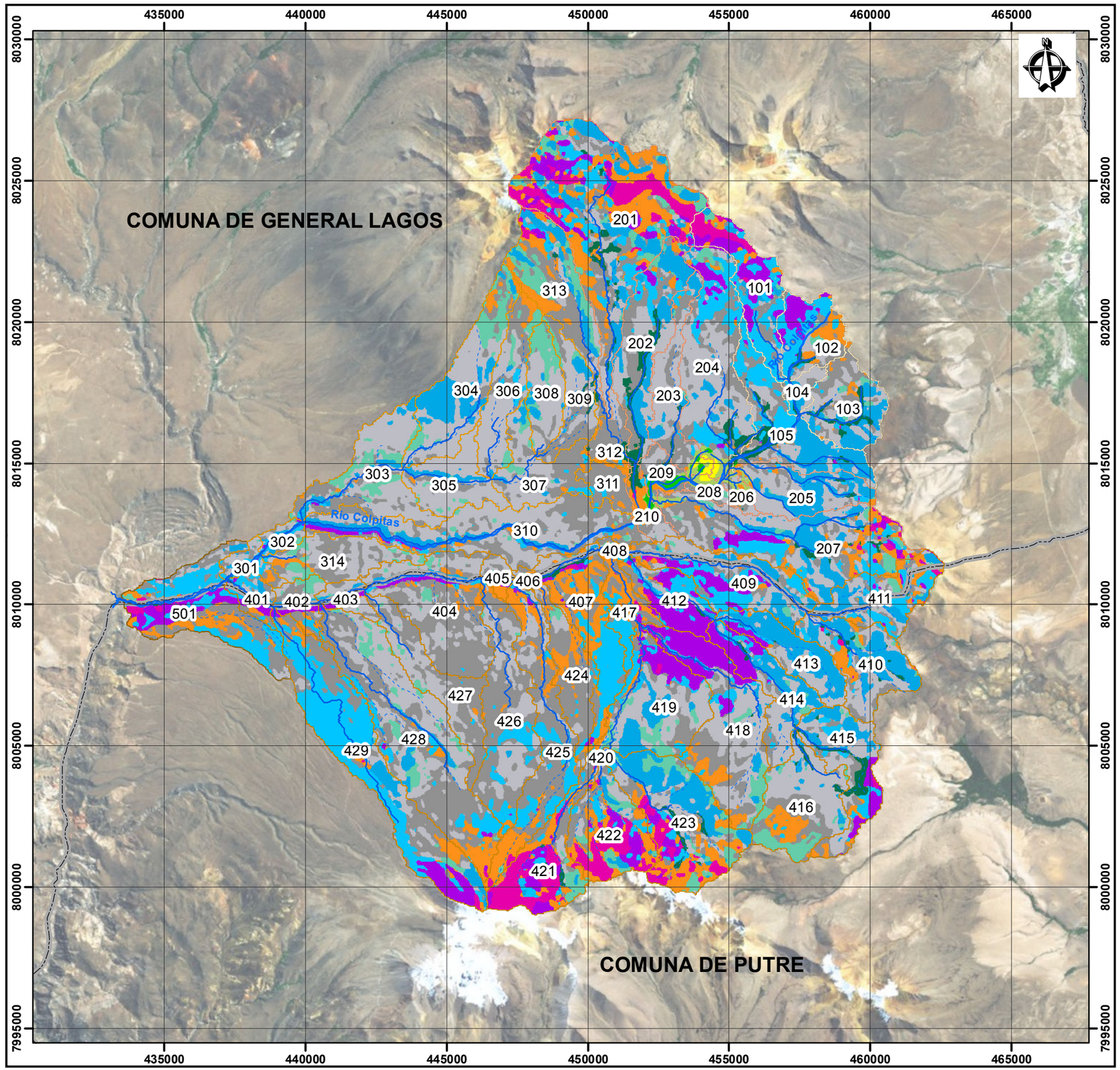
La Figura 4-44 muestra el resultado de esta clasificación, donde se aprecian las 12 clases principales identificadas dentro del área de estudio. De éstas, las tres primeras están relacionadas con las Borateras y Vegetación. En términos cuantitativos la superficie ocupada por cada clase dentro del conjunto de la Cuenca del Colpitas es variable y se desglosa como sigue (Tabla 4-55).

Tabla 4-55: Superficie total por clase identificada a partir de clasificación no supervisada de imagen Landsat 8 del 26 de abril del 2013.

Clase	Superficie (ha)	Porcentaje %
Borateras	206,2	0,5
Borateras + Vegetación	69,5	0,2
Vegetación	919,1	2,0
Clase 4	10.445,9	23,3
Clase 5	4.014,4	9,0
Clase 6	5.319,0	11,9
Clase 7	2.365,6	5,3
Clase 8	5.290,3	11,6
Clase 9	2.768,4	6,2
Clase 10	1.265,9	2,8
Clase 11	44,9	0,1
Clase 12	12.211,7	27,2

La distribución espacial de las distintas clases no tiene un patrón regular. Una misma clase puede aparecer en distintos sectores de la cuenca, no obstante ello se pueden advertir algunas tendencias. Por ejemplo la Clase 10 se presenta preferentemente en las altas cumbres del Norte y Sur de la cuenca, particularmente en asociación con las Clases 5 y en menor medida con la Clase 7. Por su parte la Clase 9 se encuentra de preferencia en el curso medio superior de la Quebrada de Allanes, así como a lo largo de esta quebrada y la de Colpitas en su parte media. La Clase 4 tiende a dominar inmediatamente aguas abajo y en el entorno de las borateras y en la parte de media de la subcuenca de Allanes. Por su parte, que es la más importante en tamaño, se presenta en mayor proporción en la Cuenca Colpitas Medio, aún cuando su presencia está en todo la cuenca, menos en Colpitas Bajo.

Al desglosar las distintas clases identificadas por cada subcuenca se tienen los siguientes resultados (ver Tabla 4-56).

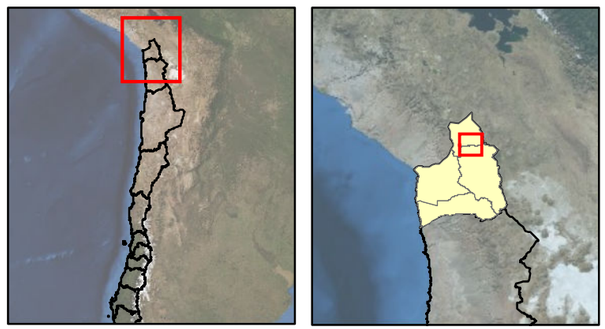


Leyenda

- Borateras
- Borateras + Vegetación
- Vegetación
- Clase 4
- Clase 5
- Clase 6
- Clase 7
- Clase 8
- Clase 9
- Clase 10
- Clase 11
- Clase 12

Subcuencas

- [101 - 105] Colpitas Alto
- [201 - 210] Colpitas en Borateras
- [301 - 314] Colpitas Medio
- [401 - 429] Quebrada Allanes
- [501] Colpitas Bajo
- Río Colpitas
- Quebradas
- Límite comunal



TITULO

Clases Sustrato por Subcuencas Colpitas

PROYECTO

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:		
amec	Dirección General de Aguas		
PROYECTO N° E90008	ESCALA: 1: 150.000	E. GRAFICA: 2 1 0 2 Km	FIGURA 4-44

Fuente:Información DGA. Imagen DigitalGlobe ESRI, Proyeccion/Datum:UTM WGS84, Zona : 19S

G:\30 PROJECTS\1 CURRENT\E90008 - Amec Cade - MOP Colpitas\02_Técnica\2_04 Planos y Figuras\MXD Finales\E90008_fig_4-44.mxd

Tabla 4-56: Porcentaje de clases de sustrato por subcuenca en Colpitas.

Subcuenca	Borateras	Borate+Vege.	Vegetación	Clase 4	Clase 5	Clase 6	Clase 7	Clase 8	Clase 9	Clase 10	Clase 11	Clase 12
101	0.0	0.0	0.0	10.5	4.9	32.8	1.7	4.9	28.7	13.1	0.0	3.4
102	0.0	0.0	3.7	13.7	15.5	30.9	4.6	0.6	19.2	0.0	0.0	11.8
103	0.0	0.0	9.0	25.1	3.5	1.6	3.9	24.9	0.0	0.1	0.0	31.9
104	0.0	0.0	9.1	13.1	0.0	14.9	3.0	15.9	0.0	0.0	0.0	44.0
105	0.2	0.1	9.6	18.0	0.8	24.5	0.1	28.9	0.4	0.0	0.0	17.4
201	0.0	0.0	2.8	13.1	22.5	10.5	5.8	14.2	9.7	12.5	0.0	8.9
202	0.0	0.0	12.5	24.1	2.6	8.2	1.5	23.7	2.0	0.2	0.0	25.3
203	4.1	1.7	2.2	24.7	0.6	3.5	1.1	11.9	0.2	0.0	3.4	46.6
204	2.9	0.3	3.7	19.0	1.0	20.4	2.0	4.0	5.1	0.0	1.1	40.8
205	1.7	0.0	1.4	9.1	2.9	2.6	0.4	39.5	0.1	0.0	0.0	42.4
206	34.6	0.0	0.2	22.9	6.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.3
207	1.4	0.0	1.6	19.0	10.6	13.0	3.6	16.6	5.9	1.7	0.0	26.6
208	33.4	0.9	0.0	29.1	0.3	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	7.0	26.1
209	5.1	19.0	9.4	33.1	9.9	2.6	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	20.5
210	7.5	6.0	12.3	23.6	25.3	2.0	0.3	0.0	0.0	2.3	0.0	20.6
301	0.0	0.0	1.4	26.5	5.9	24.9	0.7	2.4	1.8	0.0	0.0	36.2
302	0.0	0.0	2.2	16.6	0.0	28.0	13.1	10.0	3.8	0.0	0.0	26.3
303	0.0	0.0	0.0	20.0	0.9	1.5	14.9	7.1	0.4	0.0	0.0	55.1
304	0.0	0.0	0.0	8.5	3.4	0.1	15.6	28.3	0.0	0.0	0.0	44.2
305	0.0	0.0	0.0	9.0	1.4	0.0	3.0	9.3	0.0	0.0	0.0	77.3
306	0.0	0.0	0.0	20.1	5.3	5.1	9.6	2.0	0.0	0.0	0.0	57.9
307	0.0	0.0	0.1	37.0	1.6	3.5	5.7	5.5	0.0	0.0	0.0	46.7
308	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.9	26.8	6.6	0.0	0.0	0.0	55.7
309	0.0	0.0	3.9	38.5	0.5	0.7	6.2	6.4	0.0	0.0	0.0	43.9
310	0.0	0.0	0.5	31.0	2.7	2.8	1.8	12.6	3.2	0.0	0.0	45.4
311	0.0	0.0	0.6	76.5	11.4	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
312	0.0	0.0	6.7	67.9	9.5	1.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	14.3
313	0.0	0.0	1.0	28.2	16.1	2.8	20.6	15.3	1.6	1.9	0.0	12.5
314	0.0	0.0	0.0	36.0	4.3	1.0	12.5	0.2	0.0	0.0	0.0	46.1
401	0.0	0.0	6.4	18.5	6.9	22.2	0.0	13.9	23.2	0.0	0.0	8.8
402	0.0	0.0	0.7	29.9	7.6	7.0	14.3	8.1	16.1	0.0	0.0	16.3
403	0.0	0.0	0.0	11.6	1.8	7.9	2.1	11.6	14.6	0.0	0.0	50.4
404	0.0	0.0	0.0	49.6	4.4	1.9	2.9	5.1	3.8	0.0	0.0	32.3
405	0.0	0.0	6.5	15.5	16.8	5.7	2.4	13.0	6.2	0.0	0.0	34.0
406	0.0	0.0	20.3	25.1	7.2	5.6	5.6	10.9	11.8	0.0	0.0	13.3
407	0.0	0.0	4.0	17.5	34.2	34.3	0.9	1.2	2.1	0.7	0.0	5.2
408	0.0	0.0	8.7	29.1	8.9	16.1	26.7	2.2	1.2	0.0	0.0	7.2
409	0.0	0.0	0.4	11.0	5.5	24.3	2.3	20.6	13.1	0.6	0.0	22.3
410	0.0	0.0	2.5	10.5	8.7	5.9	2.2	36.7	0.3	0.8	0.0	32.7
411	0.0	0.0	1.6	10.0	12.0	21.3	3.5	25.4	2.1	1.3	0.0	22.7
412	0.0	0.0	1.7	9.3	4.8	22.1	0.2	3.5	49.1	0.8	0.0	8.5
413	0.0	0.0	0.3	2.0	1.4	7.1	0.1	57.5	6.1	0.1	0.0	25.3
414	0.0	0.0	1.8	9.2	0.0	6.7	2.4	27.4	20.6	0.0	0.0	31.9
415	0.0	0.0	9.3	13.2	4.2	10.4	1.3	18.5	10.7	0.8	0.0	31.6
416	0.0	0.0	2.8	22.0	11.4	0.8	16.1	4.0	0.0	0.0	0.0	43.0
417	0.0	0.0	0.1	23.2	38.3	33.0	0.0	0.0	3.9	1.5	0.0	0.0
418	0.0	0.0	0.1	20.1	7.3	4.6	6.3	3.4	20.9	0.2	0.0	37.0
419	0.0	0.0	0.0	14.6	4.2	9.1	10.2	15.8	13.3	0.5	0.0	32.3
420	0.0	0.0	0.0	29.5	30.2	3.6	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	35.3
421	0.0	0.0	1.8	12.9	17.7	8.4	6.9	0.8	13.1	34.2	0.0	4.1
422	0.0	0.0	0.0	11.9	20.8	7.8	8.3	5.3	9.7	26.0	0.0	10.1
423	0.0	0.0	2.6	8.2	17.9	4.5	12.3	27.5	4.1	9.6	0.0	13.4
424	0.0	0.0	0.2	58.6	22.8	5.3	2.5	0.0	0.9	0.0	0.0	9.7
425	0.0	0.0	0.0	45.3	22.0	15.3	0.7	1.1	0.6	1.3	0.0	13.7
426	0.0	0.0	0.0	50.8	2.7	12.9	0.4	0.4	0.1	0.0	0.0	32.9
427	0.0	0.0	0.0	55.3	0.8	0.6	3.8	0.0	0.1	0.0	0.0	39.4
428	0.0	0.0	0.0	38.4	6.6	7.2	7.2	3.7	0.7	0.1	0.0	36.0
429	0.0	0.0	0.0	22.6	5.3	48.0	1.3	6.1	8.7	0.6	0.0	7.3
501	0.0	0.0	2.0	26.2	14.2	33.9	0.7	2.0	12.5	3.2	0.0	5.3

5.0 MODELACIÓN

5.1 Modelo Conceptual Hidrológico

5.1.1 El Sistema Hídrico del Colpitas

La caracterización física del sistema hídrico superficial de la Cuenca del río Colpitas es el marco de referencia del estudio para entender los aportes de distintas fuentes de agua natural, que escurren por quebradas y distintos componentes geográficos aprovechando las condiciones morfológicas del lugar.

Para su elaboración debe considerarse ciertos alcances, entre los cuales cabe mencionar las siguientes:

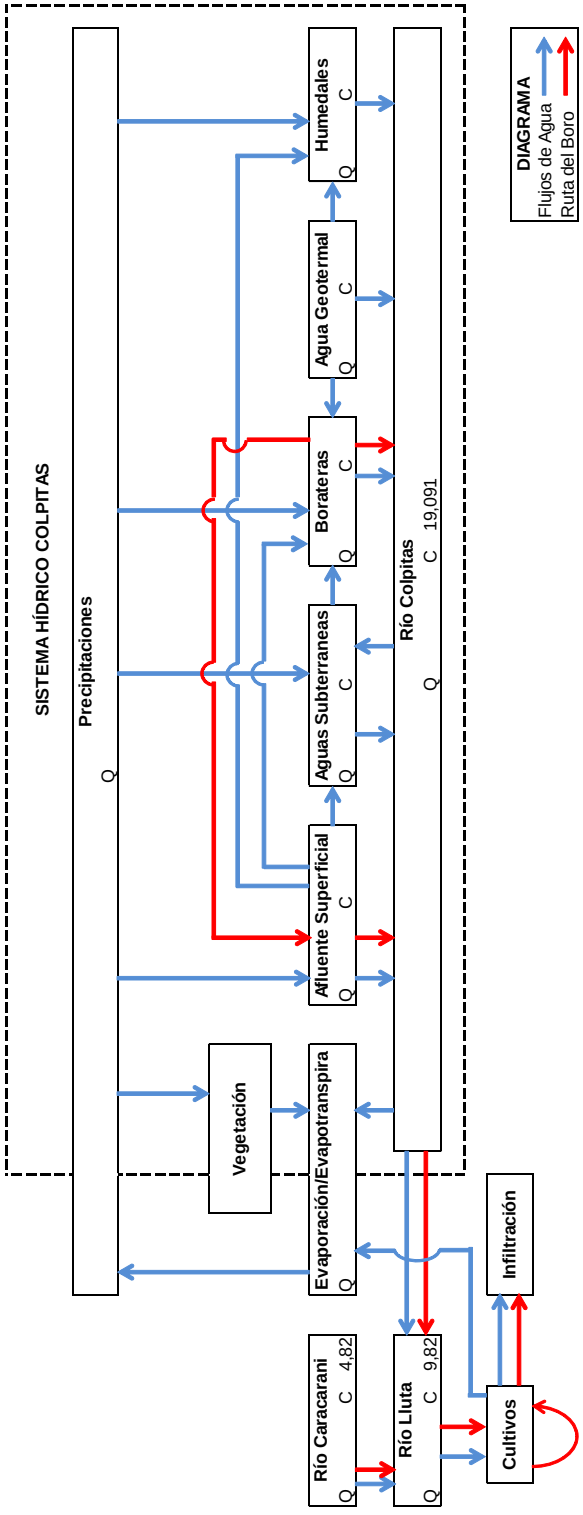
- El objetivo del estudio obliga discriminar los aportes de Boro que provienen de las borateras, parte alta de la cuenca; de aquellos que son generados en otras partes, con contenido menor de Boro. Esto se pudo constatar a partir de la Campaña N°1 de mediciones de calidad del agua.

- Este proceso de análisis exige identificar las zonas características de la Cuenca del río Colpitas, lo que ya se realizó en el Informe de Avance N°1 (E90008-263-STY-001), donde se mostraron 5 zonas, una de ellas la de las borateras cubre 100 km^2.

- Para disponer de una aproximación más profunda de la cuenca, se necesitó de un estudio de percepción remota, antes informado en la sección 4.7, que se consolida con las visitas y observaciones de terreno de los especialistas de AMEC.

- El sistema hídrico incluye los procesos y relaciones entre ellos, que incluye los sitios más relevantes, los fenómenos que en ellos se observan y en general la red de interconexiones que permiten disponer de una visión integrada de los flujos de agua existentes en la zona. La Figura 5-1 muestra este sistema en su primera aproximación que será perfeccionada en lo que resta del estudio.

Figura 5-1: Modelo conceptual del sistema hídrico de la Cuenca del río Colpitas.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Unifilar de los Ríos y Cursos de la Cuenca del Río Colpitas

Este sistema hídrico está inserto en el territorio, de tal modo que la calidad química de las aguas queda condicionada a las características del medio que lo soporta, por ello el unifilar de la Figura 5-2 expresa fundamentalmente la variedad de aportes que conforman el caudal de salida de la cuenca. Por ello no es importante determinar cada vía de flujo, sino más bien la orientación del estudio está definida hacia la química de los aportes.

El diagrama del unifilar fue construido a partir de las coberturas de información cartográfica digital obtenidas del estudio de percepción remota, para lo cual se consideraron los drenes según su jerarquía, desde 1 hasta 4.

El unifilar se plantea para cubrir los aportes significativos, entendiendo por tal el que proviene de las principales áreas aportantes al caudal del río Colpitas, lo que no necesariamente corresponde a un sólo cauce, sino que representa corrientes totales de dichos lugares. Esto sobre la hipótesis de que cada una de ellas tiene calidades químicas originadas en las respectivas áreas como base común.

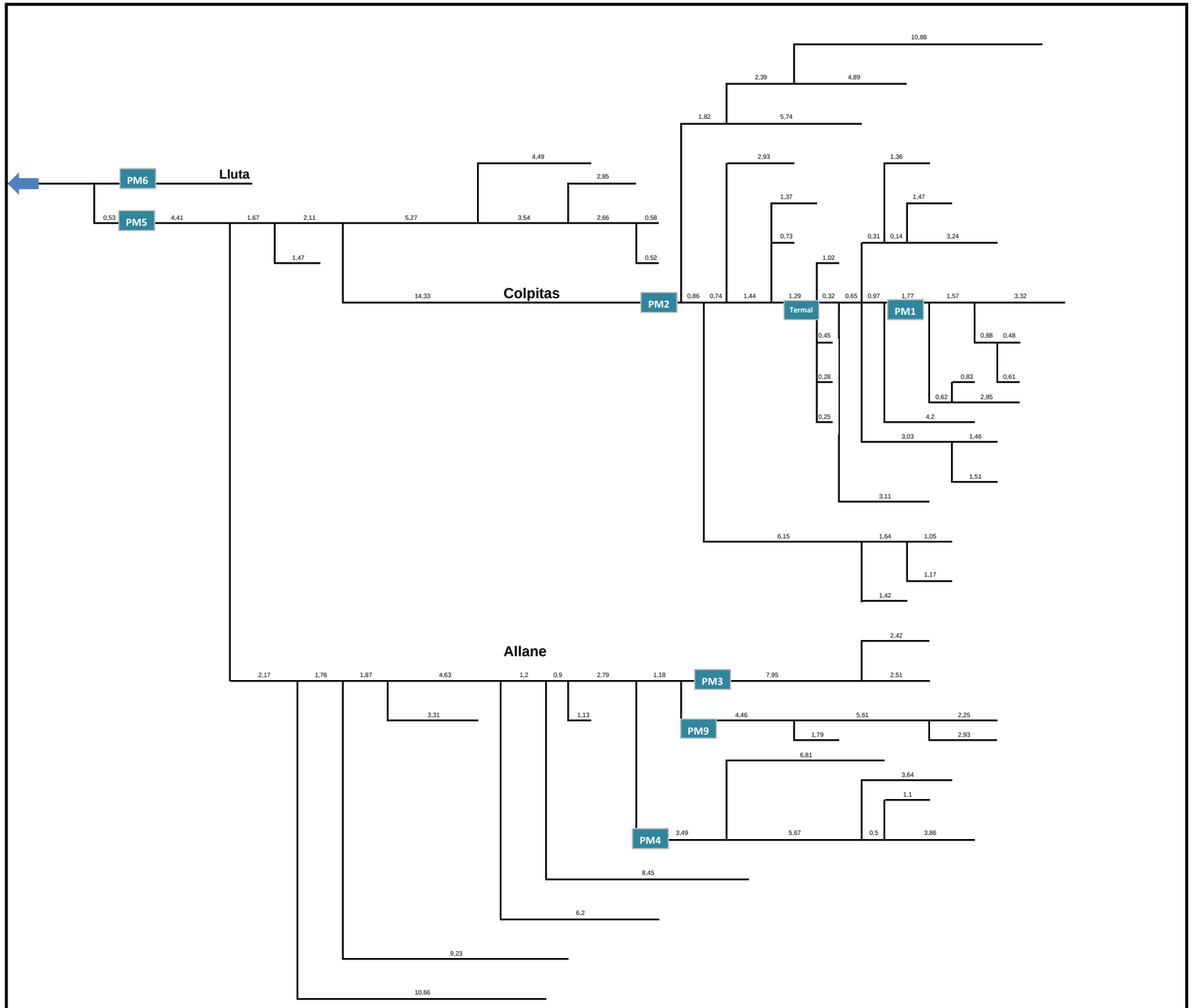
Al tratarse de una representación simplificada de la realidad, no se muestran interacciones complejas que hay que tener en mente, siendo la más importante la presencia de borateras entre los puntos PM1 y PM2.

En el unifilar hídrico puede verse en la Figura 5-2 se representaron los puntos de muestreo de calidad de agua. Los puntos PM1, PM2, Termal, y PM5 se encuentran sobre el cauce del río Colpitas, y los puntos PM3, PM4 y PM9 son representativos de los aportes indirectos y directos que tiene el río Colpitas. PM6 corresponde a Lluta en Alcérreca.

La lectura de la figura debe considerar lo siguiente:

- La orientación del diagrama asume un flujo de las aguas de derecha a izquierda, sin que esto represente necesariamente la orientación geográfica.
- Para cada curso de agua se presenta la información sobre longitud estimada del curso, expresada en kilómetros.
- Se incluyen los nombres de los cursos principales: Colpitas y Allane.
- Los puntos de muestreo de calidad de agua analizados se han representado mediante íconos cuya ubicación es referencial.

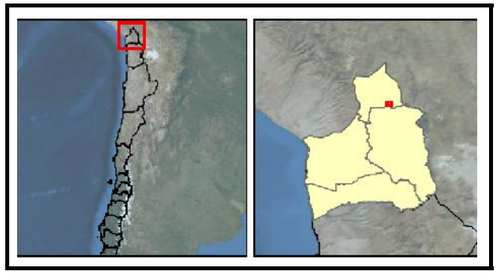
Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco



Leyenda

1,32 — Curso de agua, longitud en km

PM — Punto de muestreo Calidad de Agua



TÍTULO:

Unifilar de los ríos y cursos de la cuenca del río Colpitas

PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

CLIENTE: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-2

5.2 Balance Hidroquímico

El modelo que se propone tiene como objetivo representar el sistema de flujo y transporte del río Colpitas, de forma tal que integre los tres componentes que se han explicado anteriormente: las ecuaciones de conservación, los componentes dinámicos y los factores estructurales para las aguas superficiales y subterráneas, tanto en calidad como cantidad.

La modelación se entiende como una primera aproximación al balance hídrico del sistema, lo que se hará basado en las referencias existentes, estimaciones apropiadas y valores medidos. Los aportes químicos serán presentados a partir de los diagramas causa efecto y mediante el conocimiento de la teoría de reacciones químicas en el medio natural.

Esta sección describirá la modelación en dos partes:

- Modelación conceptual
- Modelación numérica

5.2.1 Balance Hídrico

Una cuenca hidrográfica puede ser definida como "el área topográfica de la zona en la que el escurrimiento de agua superficial aparente drena a un punto específico de un arroyo o de un cuerpo de agua, como un lago", de esta forma una cuenca funciona como un colector de agua convirtiendo las entradas de agua en escorrentía y almacenando agua. Conociendo las características de una cuenca (precipitación, escurrimiento, evapotranspiración e infiltración de las aguas subterráneas), permitirá evaluar la temporada y la disponibilidad espacial del agua, esto es útil para la asignación y control de flujo del agua.

El balance hídrico es una herramienta que permite conocer características de la cuenca mediante la aplicación del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad, de acuerdo con este principio, cualquier diferencia entre las entradas y salidas deben reflejarse en un cambio en el almacenamiento de agua dentro del área del presupuesto.

En la Figura 5-1 se muestra un esquema con las entradas, salidas y cambios en el almacenamiento de la Cuenca del Río Colpitas correspondientes a las siguientes ecuaciones a emplear en este balance:

$$\text{Salidas} - \text{Entradas} = 0$$

$$ET + Ev + Go + So - P - Si - AS - \text{Agua aportante} = 0$$

Donde,

ET: Evotranspiración

Ev: Evaporación

Go: Agua subterránea que sale

P: Precipitación

Si: Escorrentía superficial

AS: Afloramiento de agua subterránea

En el balance hídrico entran distintas corrientes de entrada y salida de un volumen de control, que queda definido como el sistema a estudiar. En este caso se considerará como zona de estudio desde el nacimiento del río Colpitas hasta su confluencia con el río Lluta. En principio, en todo balance se deben considerar tres grandes bloques de información, que corresponden a la aplicación de la conservación de la materia, a los procesos cinéticos o dinámicos que se relacionan con la calidad y cantidad del recurso, y a los factores constituyentes del medio físico donde se produce el flujo de las aguas.

En la aplicación del concepto de conservación de la materia cabe identificar y estimar los flujos de entrada y salida del volumen de control. La pluviometría y las recargas son las entradas más relevantes de estos sistemas, mientras que sus salidas están dadas por el flujo final del volumen de control, que en este caso corresponde a la confluencia con el río Lluta; los procesos de evaporación y evapotranspiración; la infiltración de aguas; y el uso de ellas sea natural o antrópica. Con la información existente, el uso de datos de terreno y estimaciones apropiadas se deberá construir un balance hídrico preliminar a nivel de perfil del estudio.

Los supuestos considerados para realizar el balance hídrico son:

- Se realizará el balance hídrico de la Cuenca del Valle del Colpitas en condición sin el ‘invierno altiplánico’.
- No se considerarán los afluentes, solo el área aportante sobre el río
- Debido a las escasas precipitaciones de la zona, el término de precipitaciones se considera cero
- Debido a las condiciones de escasez de precipitaciones, el término de escorrentía superficial se considera cero

- Como datos de ingreso se considerarán los afloramientos subterráneos por parte de las borateras y quebradas
- La evapotranspiración es aportada por la boratera
- La evaporación se considera en el superficie libre del río y de la boratera
- El consumo se considerará despreciable para este caso

Considerando la convención ingeniería química, el balance queda expresado como las salidas con signo positivo y las entradas con signo negativo.

Así la expresión de balance queda expresada como:

$$PM5 + ET + Ev – PM9 – PM4 – AP1 – AP2 – PM1 – AS = 0$$

Para convertirse en:

$$AS = PM5 + ET + Ev – PM9 – PM4 – AP1 – AP2 – PM1$$

Donde AS es el caudal de agua subterránea que falta considerar en el balance total de agua

El valor de AS es mayor o al menos igual a 1,208 m^3/s.

Agregando como alcances que faltan algunas corrientes muy menores en la expresión de balance, como AP1 y AP2, que se estiman no superiores al 1% del total. Además, PM9 y PM4 son despreciables.

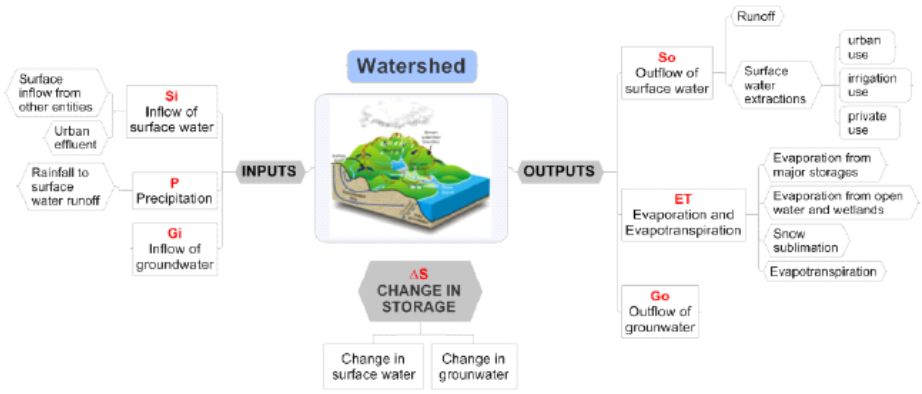
Este balance es de tipo conceptual y efectuado sobre valores medios en base a las mediciones realizadas.

La memoria de cálculo del Balance Hídrico se muestra en la Figura 5-3, a su vez las explicaciones de las memorias de cálculo de la evotranspiración y la evaporación se muestran en las secciones 5.2.2 y 5.2.3 respectivamente.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Figura 5-3: Ecuación general del balance hídrico de la cuenca.

Nombre	Abreviación
Escorrentía superficial	Si
Precipitación	P
Afloramiento agua subterránea	As
Cambio en el almacenamiento	ΔS
Evapotranspiración	ET
Evaporación	EV
Agua superficial que sale	So
Agua subterránea que sale	Go
Cambios en el agua superficial	ΔS S
Cambios en el agua subterránea	ΔS G



Salidas - Entradas = 0

Entradas: P = 0
Si = 0
Agua subterránea=?
Agua aportante=?

⇨ **Entradas = AS+Agua aportante**

Salidas: Eto = Boratera
EV = Río Colpitas
Go = 0
So = caudal río
Consumo = 0
ΔS = 0

⇨ **Salidas = ET + EV + So**

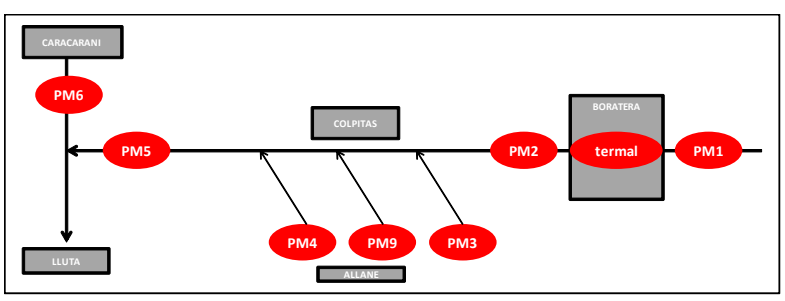
SUPUESTOS

Se realizó el balance hídrico de la cuenca del Valle de Colpitas en condición sin invierno altiplánico
No se consideraron los afluentes, solo el área aportante sobre el río
Debido a las escasas precipitaciones de la zona, el termino de precipitaciones se considera cero
Debido a las condiciones de escasez de precipitaciones, el termino de escorrentía superficial se considera cero
Como datos de ingreso se considerarán los afloramientos subterraneos por parte de las borateras y quebradas
La evapotranspiración es aportada por la boratera
La evaporación se considera en el superficie libre del río y de la boratera
El consumo se considerará despreciable para este caso

DATOS

PM3	0,010	m3/s
PM1	0,043	m3/s
Superficie Boratera	695000	m2
Tasa evapotranspiración	0,000000766	m/s
ET	0,533	m3/s
Tasa evaporación	0,00000246	m/s
Longitud cauce	22520	m
Ancho promedio cauce	2,4	m
EV	0,133	m3/s
PM5	0,586	m3/s

PM9 y PM4 son despreciables



RESULTADOS

AS=PM5+Et+Ev-PM9-PM4-PM3-PM1

AS	**1,199**	**m3/s**

5.2.2 Cálculo Evapotranspiración

Método para estimar la evapotranspiración de referencia

Método	Fórmula
Hargreaves-Samani 1985	$Et_o = 0.0023 * R_a * (T + 17.89) * TD^{0.5}$

Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\,aj}$)

Coeficientes

TD=(T°max-T°min.) (°C)

Expresión de la ecuación	Descripción	Referencia
Eto	Evapotranspiración sobre un cultivo de referencia (mm/día)	Torres y Vasquez, 2013
Ra	Radiación extraterrestre (mm/día)	FAO, 2006
T	Temperatura promedio del aire a 2 metros de altura (ºC)	
Tº max	Tº maxima (ºC)	
Tº min	Tºminima (ºC)	

Factores de conversión para expresar evapotranspiración

	Altura de agua	volumen por unidad de área		energía por unidad de área *
	mm día^{-1}	m^3 ha^{-1} día^{-1}	l s^{-1} ha^{-1}	MJ m^{-2} día^{-1}
1 mm día^{-1}	1	10	0,116	2,45
1 m^3 ha^{-1} día^{-1}	0,1	1	0,012	0,245
1 l s^{-1} ha^{-1}	8,640	86,40	1	21,17
1 MJ m^{-2} día^{-1}	0,408	4,082	0,047	1

* Para el agua con una densidad de 1 000 kilogramos m^{-3} y a 20 °C.

Resultados

Meses	Ra	Tmax	Tmin	TD (°C)	T (°C)	Et_o
ene-2010	10,6	30,20	12,70	17,50	21,45	4,015
feb-2010	9,1	83,90	16,10	67,80	50,00	11,698
mar-2010	9,5	29,10	12,60	16,50	20,85	3,441
abr-2010	7,8	30,90	10,40	20,50	20,65	3,128
may-2010	6,4	29,20	7,50	21,70	18,35	2,471
jun-2010	5,8	22,50	6,20	16,30	14,35	1,734
jul-2010	6,6	20,50	2,10	18,40	11,30	1,892
ago-2010	7,5	30,70	4,00	26,70	17,35	3,144
sep-2010	8,4	27,30	4,90	22,40	16,10	3,125
oct-2010	10,2	24,20	7,50	16,70	15,85	3,222
nov-2010	11,5	26,40	7,70	18,70	17,05	3,984
dic-2010	11,2	28,00	9,30	18,70	18,65	4,078
Anual 2010	8,7	31,91	8,42	23,49	20,16	3,695
ene-2011	10,3	29,70	11,20	18,50	20,45	3,915
feb-2011	9,3	30,60	14,40	16,20	22,50	3,478
mar-2011	9,7	28,90	11,40	17,50	20,15	3,539
abr-2011	8,0	28,40	10,30	18,10	19,35	2,929
may-2011	6,8	25,30	7,10	18,20	16,20	2,279
jun-2011	5,8	23,70	8,50	15,20	16,10	1,753
jul-2011	5,3	23,20	7,80	15,40	15,50	1,598
ago-2011	6,9	22,30	6,60	15,70	14,45	2,020
sep-2011	8,5	24,00	5,90	18,10	14,95	2,740
oct-2011	10,0	26,60	6,00	20,60	16,30	3,553
nov-2011	10,8	26,40	9,00	17,40	17,70	3,678
dic-2011	9,9	28,50	11,10	17,40	19,80	3,570
Anual 2011	8,4	26,47	9,11	17,36	17,79	2,883
ene-2012	9,5	30,40	12,50	17,90	21,45	3,624
feb-2012	8,7	31,30	12,80	18,50	22,05	3,434
mar-2012	8,6	30,60	13,40	17,20	22,00	3,260
abr-2012	7,7	29,90	9,60	20,30	19,75	2,992
may-2012	7,5	27,60	7,00	20,60	17,30	2,743
jun-2012	6,5	25,40	8,00	17,40	16,70	2,153
jul-2012	6,4	22,80	7,10	15,70	14,95	1,929
ago-2012	7,1	23,30	7,50	15,80	15,40	2,161
sep-2012	8,2	24,80	8,50	16,30	16,65	2,630
oct-2012	9,7	26,90	9,60	17,30	18,25	3,343
nov-2012	8,6	26,80	8,80	18,00	17,80	3,012
dic-2012	7,1	28,80	11,00	17,80	19,90	2,603
Anual 2012	8,0	27,38	9,65	17,73	18,52	2,807
ene-2013	6,4	29,50	11,10	18,40	20,30	2,398
feb-2013	4,8	31,90	14,20	17,70	23,05	1,891
mar-2013	3,8	31,20	11,30	19,90	21,25	1,540
abr-2013	3,4	27,40	8,50	18,90	17,95	1,214
may-2013	2,4	26,80	5,90	20,90	16,35	0,881
jun-2013	2,2	24,30	4,80	19,50	14,55	0,712
jul-2013	2,3	26,10	5,00	21,10	15,55	0,822
ago-2013	2,7	22,40	5,50	16,90	13,95	0,823
sep-2013	3,5	25,30	8,50	16,80	16,90	1,151
oct-2013	4,0	25,10	9,10	16,00	17,10	1,274
nov-2013	4,3	27,50	7,60	19,90	17,55	1,558
dic-2013	4,3	28,70	11,20	17,50	19,95	1,560
Anual 2013	3,7	27,18	8,56	18,63	17,87	1,303

ET promedio	2,719
ET máximo	11,698
ET mínimo	0,712

5.2.3 Cálculo Evaporación

Método para estimar la evaporación

Método	Fórmula
Fitzgerald (1886)	$E = (0.4 + 0.449 \cdot V)(e_s - e_d)$
	$e_s = 6.11 \cdot 10^{[7.5 \cdot T_a / (T_a + 237)]}$
	$e_d = HR \cdot e_s$

Expresión de la ecuación	Descripción	Referencia
E	Evaporación (mm)	Dussaubat y Vargas, 2005
V	Velocidad del viento a altura z (m/s)	
e_s	Tensión de vapor saturante para temperatura superficial del agua (mmHg)	
e_d	Tensión de vapor en el aire (mmHg)	
T_a	Temperatura del aire (°C)	
HR	Humedad relativa	

Resultados

Meses	Velocidad del viento	Humedad Relativa	T_a	e_s	e_d	E
ene-2010	1,90	0,62	21,45	25,62	15,75	12,38
feb-2010	2,91	0,75	50,00	123,78	93,21	52,21
mar-2010	1,82	0,65	20,85	24,69	15,97	10,61
abr-2010	1,82	0,71	20,65	24,39	17,27	8,67
may-2010	1,62	0,74	18,35	21,14	15,60	6,25
jun-2010	1,51	0,78	14,35	16,38	12,72	3,94
jul-2010	1,62	0,76	11,30	13,41	10,20	3,62
ago-2010	1,71	0,76	17,35	19,84	15,10	5,53
sep-2010	1,90	0,76	16,10	18,33	13,97	5,47
oct-2010	2,13	0,71	15,85	18,04	12,75	7,16
nov-2010	2,21	0,69	17,05	19,47	13,36	8,52
dic-2010	2,13	0,65	18,65	21,54	13,96	10,28
Anual 2010	1,94	0,71	20,16	23,66	16,89	8,62
ene-2011	1,90	0,60	20,45	24,09	14,52	12,00
feb-2011	1,82	0,60	22,50	27,31	16,41	13,26
mar-2011	1,82	0,61	20,15	23,64	14,47	11,17
abr-2011	1,71	0,68	19,35	22,50	15,37	8,32
may-2011	1,71	0,74	16,20	18,45	13,67	5,57
jun-2011	1,62	0,78	16,10	18,33	14,30	4,55
jul-2011	1,51	0,80	15,50	17,64	14,06	3,86
ago-2011	1,71	0,78	14,45	16,48	12,77	4,33
sep-2011	2,02	0,75	14,95	17,02	12,73	5,60
oct-2011	2,13	0,69	16,30	18,56	12,73	7,90
nov-2011	2,21	0,68	17,70	20,29	13,74	9,13
dic-2011	2,02	0,65	19,80	23,14	15,09	10,51
Anual 2011	1,85	0,70	17,79	20,40	14,20	7,62
ene-2012	1,90	0,59	21,45	25,62	15,06	13,24
feb-2012	1,71	0,60	22,05	26,57	15,92	12,43
mar-2012	1,82	0,65	22,00	26,49	17,19	11,32
abr-2012	1,71	0,65	19,75	23,07	15,02	9,39
may-2012	1,62	0,73	17,30	19,78	14,36	6,12
jun-2012	1,40	0,75	16,70	19,04	14,36	4,82
jul-2012	1,51	0,75	14,95	17,02	12,84	4,52
ago-2012	1,71	0,76	15,40	17,52	13,37	4,85
sep-2012	1,90	0,75	16,65	18,98	14,18	6,03
oct-2012	2,21	0,71	18,25	21,00	14,83	8,60
nov-2012	2,13	0,69	17,80	20,42	14,01	8,69
dic-2012	2,13	0,65	19,90	23,28	15,02	11,20
Anual 2012	1,81	0,69	18,52	21,36	14,72	8,06
ene-2013	2,02	0,64	20,30	23,87	15,25	11,24
feb-2013	1,82	0,59	23,05	28,24	16,74	13,99
mar-2013	1,82	0,66	21,25	25,30	16,73	10,44
abr-2013	1,62	0,68	17,95	20,61	13,93	7,54
may-2013	1,51	0,73	16,35	18,62	13,59	5,42
jun-2013	1,40	0,76	14,55	16,59	12,53	4,18
jul-2013	1,40	0,78	15,55	17,69	13,78	4,02
ago-2013	1,62	0,76	13,95	15,96	12,16	4,29
sep-2013	1,90	0,74	16,90	19,29	14,19	6,39
oct-2013	2,13	0,71	17,10	19,53	13,81	7,76
nov-2013	2,02	0,67	17,55	20,10	13,55	8,55
dic-2013	1,90	0,63	19,95	23,35	14,64	10,93
Anual 2013	1,76	0,69	17,87	20,51	14,25	7,46

Ev Promedio	8,82
Ev máximo	52,21
Ev mínimo	3,62

5.2.4 Balance Químico

El modelación geoquímica conceptual se realiza considerando lo siguiente:

- Los puntos de medición corresponden a corrientes superficiales que aportan materias diversas a la corriente de salida del río Colpitas en Alcérreca.

- Los aportes pueden ser evaluados en términos másicos para cada elemento incorporado al agua.

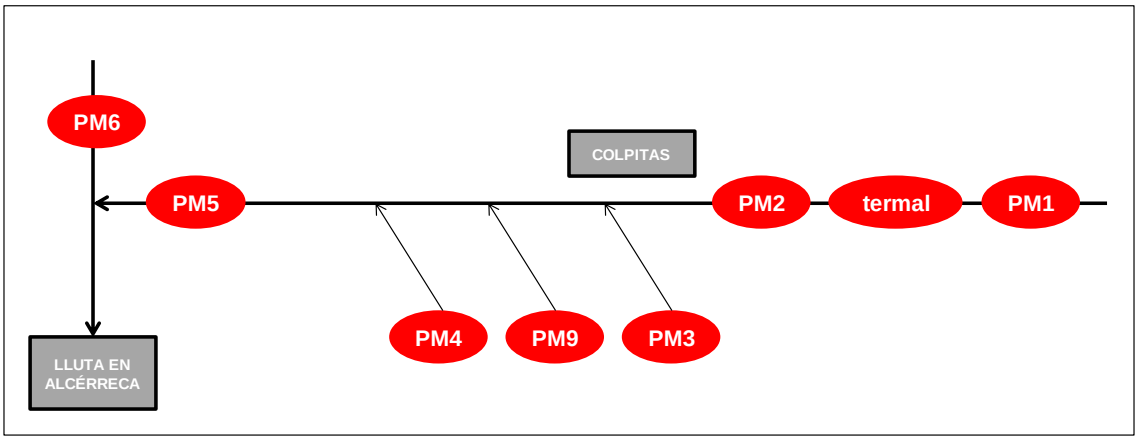
- En principio no se incluyen efectos de la pluviometría local, que es muy escasa y que no se presentó en el periodo de las mediciones. En forma preliminar no se ha incluido el efecto de evaporación, sin embargo será incorporada en versiones más desarrolladas del balance.

- Consecuente con lo anterior se puede establecer la cuantía de los aportes por elemento para cada una de las corrientes medidas, lo que permite una aproximación a la importancia de cada una de ellas respecto de los elementos químicos contenidos.

- Los balances consideran que la densidad del agua es constante e igual a 1 kg/L, situación que no es exacta pero que permite una aproximación razonable.

En la geoquímica de la cuenca del río Colpitas predominan ciertos elementos químicos, que están presentes naturalmente, pero que resultan de gran influencia en las actividades y salud humanas. Para comprender cómo se comporta geoquímicamente el flujo superficial de la cuenca del río Colpitas, se realizó una simplificación de sus cauces principales y aportantes en un diagrama simplificado en la Figura 5-4. Mostrando los puntos de monitoreo principales PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, y PM6, y la estación de monitoreo de la DGA Lluta en Alcérreca, y el punto de control ‘Termal’ que se encuentra en la zona de las borateras.

Figura 5-4: Diagrama simplificado de la cuenca del río Colpitas.



Fuente: Elaboración propia.

El diagrama simplificado de la Figura 5-4 usa valores de caudal másico para los elementos o compuestos principales presentes en los cauces de agua. Para realizar el análisis del unifilar simplificado se usaron los promedios de los parámetros analizados de las Campañas de terreno N°1, 2, y 3, y para los puntos de monitoreo PM5 y PM6 se usaron los promedios de la Campañas de terreno junto con los datos históricos informados. Estos promedios fueron estadísticamente correlacionados y validados en la sección 4.1.2.

El primer paso del Balance Químico se muestra en la Tabla 5-1, que muestra el caudal másico de los principales elementos o compuestos, y que se calculó según la siguiente ecuación:

$$C_mA\ (g/s) = CA\ (mg/L) \cdot Q\ (m^3/s)$$

Donde:

C_mA = caudal másico de “A”

CA = concentración de “A”

Q = caudal en el punto de monitoreo

A partir del caudal másico se estimó el aporte de cada uno de los elementos o compuestos desde la zona alta de la cuenca inmediatamente después de las borateras (PM2), comparando con el punto de monitoreo aguas más abajo (PM5). Esta comparación permite comprender cuál es el aporte de la zona inmediatamente después de las borateras al Lluta, pues el punto PM5 se encuentra en la estación de

monitoreo Colpitas en Alcérreca y es el punto más próximo a la confluencia con el Caracarani. La comparación se realizó de la siguiente manera:

$$\frac{Q_m A_{PM2}}{Q_m A_{PM5}} \cdot 100$$

Donde:

$Q_m A_{PM2}$ = Caudal másico de “A” en el punto de monitoreo PM2

$Q_m A_{PM5}$ = Caudal másico de “A” en el punto de monitoreo PM5

Los resultados de la Tabla 5-2 muestran que más del 100% de Boro que se encuentra en PM5 proviene desde PM2. Este resultado no tiene sentido físico en sí; si no que muestra que además que todo el Boro proviene del Punto PM2, hay cierta cantidad de Boro que está siendo eliminado desde la columna de agua desde el punto PM2 al punto PM5. La forma más común de eliminar compuestos o elementos de la columna de agua es hacerlos sedimentar al fondo del río. La forma de sedimentación puede variar; precipitación directa, co-precipitación, o sorción (adsorción o absorción) sobre material reactivo fino.

Así como el Boro, otros elementos o compuestos como el Sodio, cloruro, Arsénico, y Cobre también provienen exclusivamente de PM2. También para estos elementos ocurre lo mismo que para Boro, parte de su concentración es eliminada desde la columna de agua por alguno o mezclas de los fenómenos antes mencionados. Otros elementos o compuestos provienen en gran parte desde PM2, como el Calcio, sulfato, bicarbonato, y Hierro cuyos caudales másicos provienen en más de un 70% desde PM2.

Otros elementos o compuestos como Magnesio, Potasio, y carbonato provienen en menor medida desde PM2. Esto puede deberse a que otros aportes, aguas abajo PM2, son de aguas de distinto origen, que aportan en otra medida Potasio o Magnesio. Los aportes observados y registrados son; PM4 que ya se definió como agua de tipo sulfatada cálcica-sódica potásica, y PM3 y PM9 definidas como aguas bicarbonatadas sódicas-potásicas. Estos aportes no tendrían o tendrían concentraciones no detectables de Boro, Arsénico, y Cobre.

Con la Tabla 5-2 ya demostrando que la mayor parte de los elementos o compuestos de importancia geoquímica provienen de PM2, en necesario saber si estos provienen desde las borateras o estaban presentes aguas arriba de ellas. Para esto se hizo un análisis similar al anterior, para los puntos PM1 (Colpitas antes de las borateras) y PM2 (Colpitas después de las borateras). El análisis se realizó de la siguiente manera:

$$\frac{Q_m A_{PM1}}{Q_m A_{PM2}} \cdot 100$$

Donde:

$Q_m A_{PM1}$ = Caudal másico de “A” en el punto de monitoreo PM1

$Q_m A_{PM2}$ = Caudal másico de “A” en el punto de monitoreo PM2

La Tabla 5-3 muestra que todos los elementos o compuestos que están en PM2 provienen con más de un 86% desde las borateras. Específicamente; Coro, Sodio, cloruro y Arsénico provienen exclusivamente desde las borateras. Esto explica que la mayor parte de la contaminación es de origen natural, y se debe a la presencia de las borateras. Además se debe observar que un 86% del caudal que pasa por PM2 proviene desde las borateras, esto dado su condición de sistema hidrotermal.

El análisis simple composicional de las borateras se debe hacer a partir de la composición molar de los elementos o compuestos presentes en ella. Para esto se realizó el siguiente cálculo:

$$\frac{(Q_m A_{PM2} - Q_m A_{PM1})}{M_A}$$

Donde:

$Q_m A_{PM1}$ = Caudal másico de “A” en el punto de monitoreo PM1

$Q_m A_{PM2}$ = Caudal másico de “A” en el punto de monitoreo PM2

M_A = Masa molar de “A”

La Tabla 5-4 muestra el análisis molar descrito arriba. Se muestra que hay una salida de 1,744 (mol/s) de Boro desde las borateras. Así también se muestra el aporte molar de cada uno de los elementos o componentes. Para tener un sentido físico de este análisis se comparó con los dos minerales mayoritarios de las borateras; la Ulexita y la Halita. La Ulexita tiene una composición molar de $CaNaB_5O_9 \cdot 8H_2O$, y la Halita de NaCl. Haciendo proporciones molares estequiométricas para la Ulexita entre Calcio:Boro (1:5) y Sodio:Boro (1:5) se puede aproximar las razones molares de los elementos de la boratera.

Con el análisis molar estequiométrico de la Ulexita se define que si todo el Boro forma parte de Ulexita, entonces 0,349 moles de Calcio y lo mismo de Sodio están involucrados. La misma razón se hace para Halita, con una razón molar estequiométrica Na:Cl (1:1). Con el restante de moles de Sodio desde la boratera, se estima que la misma cantidad de cloruro proviene de Halita. Con este análisis se puede inferir que las aguas provenientes de las borateras poseen iones de la disolución de los minerales Ulexita y Halita casi exclusivamente.

Como el análisis de la Tabla 5-4 es inferido sobre la base de la diferencia de los caudales másicos entre los puntos de monitoreo PM2 y PM1, pueden existir otros aportes no considerados dentro de la zona de las borateras, de aguas que no presentan el mismo origen hidrotermal. Para poder dilucidar esta incógnita, se realizó un análisis similar al anterior con el punto de monitoreo “Termal”. Este punto de monitoreo presenta solo resultados de análisis composicional, pero no de caudal, ya que la muestra fue tomada desde la surgencia de la fuente hidrotermal misma, por lo que el flujo ascendente no puede ser medido como caudal.

La Tabla 5-5 muestra que la misma razón molar estequiométrica usada en el análisis anterior se cumple. Las cantidades de Boro, Calcio y Sodio (expresados como moles/L) son proporcionales a la fórmula química de la Ulexita, mientas que el resto del Sodio junto con cloruro muestras proporciones pertenecientes a la Halita. Esto refuerza la idea de que las aguas provenientes de las borateras desde las fuentes hidrotermales están compuestas por productos de disolución de los minerales propios de las borateras.

Tabla 5-1: Caudales másicos para selección de parámetros en los puntos de monitoreo PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, y PM6, y en la estación Lluta en Alcérreca.

Punto de Monitoreo	Q (m^3/s)	Q_m B (g/s)	Q_m Ca (g/s)	Q_m Mg (g/s)	Q_m K (g/s)	Q_m Na (g/s)	Q_m SO_4^{-2} (g/s)	Q_m Cl^- (g/s)	Q_m HCO_3^- (g/s)	Q_m CO_3^{-2} (g/s)	Q_m As (g/s)	Q_m Cu (g/s)	Q_m Fe (g/s)
PM1	0,043	0,035	1,223	0,390	0,218	0,927	4,270	0,276	2,800	0,004	0,001	0,002	0,007
PM2	0,304	18,89	33,01	5,468	18,52	221,3	101,7	374,3	71,72	0,030	140,3	0,045	0,441
PM3	0,010	0,079	0,351	0,115	0,057	1,604	0,549	1,801	2,246	0,154	0,002	0,000	0,001
PM4	0,066	0,007	0,795	0,143	0,223	0,578	5,801	0,075	0,046	0,007	0,000	0,001	0,082
PM5	0,586	11,26	46,17	16,87	33,69	197,8	126,7	338,3	76,34	1,644	0,295	0,013	0,598
PM6	1,359	6,492	99,26	52,02	36,02	188,9	478,6	324,6	45,37	0,136	0,183	0,055	6,691
Lluta en Alcérreca	1,945	19,10	152,0	69,22	74,57	407,9	567,6	687,0	121,9	1,658	0,403	0,102	10,39

Tabla 5-2: Análisis comparativo entre los puntos de monitoreo PM2 y PM5.

Punto de Monitoreo	Q (m^3/s)	Q_m B (g/s)	Q_m Ca (g/s)	Q_m Mg (g/s)	Q_m K (g/s)	Q_m Na (g/s)	Q_m SO_4^{-2} (g/s)	Q_m Cl^- (g/s)	Q_m HCO_3^- (g/s)	Q_m CO_3^{-2} (g/s)	Q_m As (g/s)	Q_m Cu (g/s)	Q_m Fe (g/s)
PM2	0,304	18,89	33,01	5,468	18,52	221,3	101,7	374,3	71,72	0,030	140,3	0,045	0,441
PM5	0,586	11,26	46,17	16,87	33,69	197,8	126,7	338,3	76,34	1,644	0,295	0,013	0,598
% proveniente de PM2	52%	168%	71%	32%	55%	112%	80%	111%	94%	2%	47522%	350%	74%

Tabla 5-3: Análisis comparativo entre los puntos de monitoreo PM1 y PM2.

Punto de Monitoreo	Q (m^3/s)	Q_m B (g/s)	Q_m Ca (g/s)	Q_m Mg (g/s)	Q_m K (g/s)	Q_m Na (g/s)	Q_m SO_4^{-2} (g/s)	Q_m Cl^- (g/s)	Q_m HCO_3^- (g/s)	Q_m CO_3^{-2} (g/s)	Q_m As (g/s)	Q_m Cu (g/s)	Q_m Fe (g/s)
PM1	0,043	0,035	1,223	0,390	0,218	0,927	4,270	0,276	2,800	0,004	0,001	0,002	0,007
PM2	0,304	18,89	33,01	5,468	18,52	221,3	101,7	374,3	71,72	0,030	140,3	0,045	0,441
% proveniente de la boratera	86%	100%	96%	93%	99%	100%	96%	100%	96%	86%	100%	95%	98%

Tabla 5-4: Análisis molar de los componentes en la boratera.

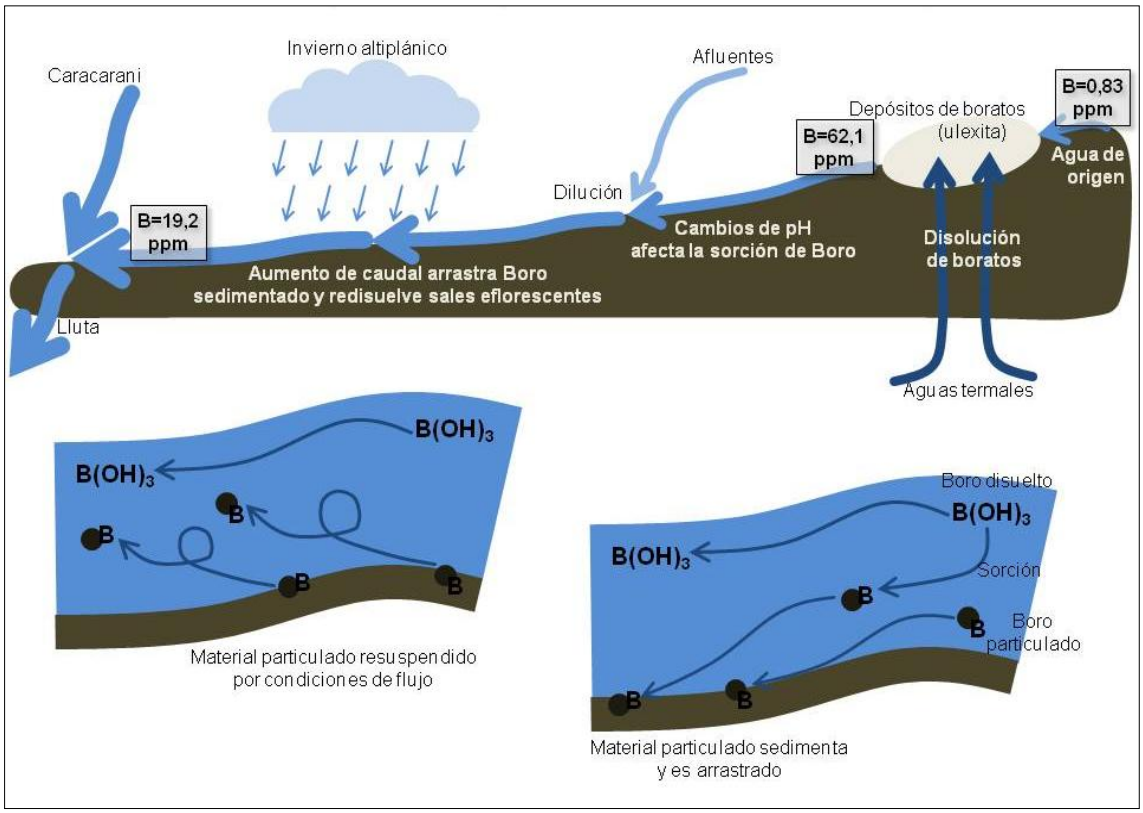
Punto de Monitoreo	Q (m^3/s)	Q_m B (g/s)	Q_m Ca (g/s)	Q_m Mg (g/s)	Q_m K (g/s)	Q_m Na (g/s)	Q_m SO_4^{-2} (g/s)	Q_m Cl^- (g/s)	Q_m HCO_3^- (g/s)	Q_m CO_3^{-2} (g/s)	Q_m As (g/s)	Q_m Cu (g/s)	Q_m Fe (g/s)
PM1	0,043	0,035	1,223	0,390	0,218	0,927	4,270	0,276	2,800	0,004	0,001	0,002	0,007
PM2	0,304	18,89	33,01	5,468	18,52	221,3	101,7	374,3	71,72	0,030	140,3	0,045	0,441
PM2-PM1	0,262	18,86	31,78	5,078	18,30	220,4	97,41	374,0	68,92	0,026	140,2	0,043	0,434
Masa molar (g/mol)	-	10,81	40,08	24,31	39,10	22,99	96,06	35,45	61,02	60,01	74,92	63,55	55,85
moles		1,744	0,793	0,209	0,468	9,586	1,014	10,55	1,129	0,000	1,872	0,001	0,008
$CaNaB_5O_9 \cdot 8H_2O$		1,744	0,349			0,349							
NaCl						9,237		9,237					

Tabla 5-5: Análisis molar de los componentes del punto de monitoreo “Termal”.

Punto de Monitoreo	CB (mg/L)	CCa (mg/L)	CMg (mg/L)	CK (mg/L)	CNa (mg/L)	CSO_4^{-2} (mg/L)	CCl^- (mg/L)	$CHCO_3^-$ (mg/L)	CCO_3^{-2} (mg/L)	CAs (mg/L)	CCu (mg/L)	CFe (mg/L)
Termal	296,7	175,3	24,33	250,7	3814	316,3	6704	966,3	0,100	2296	0,077	0,503
Masa molar (g/mol)	10,81	40,08	24,31	39,10	22,99	96,06	35,45	61,02	60,01	74,92	63,55	55,85
Moles	27,47	4,383	1,001	6,427	165,8	3,295	188,8	15,84	0,002	30,64	0,001	0,009
$CaNaB_5O_9 \cdot 8H_2O$	27,47	5,494			5,494							
NaCl					160,3		160,3					

Con todo este análisis es posible presentar un modelo conceptual que muestra como principal elemento al Boro.

Figura 5-5: Modelo conceptual del comportamiento del Boro en el sistema de estudio



En este modelo conceptual se observa con una flecha azul, que el agua de origen pasa por los depósitos de boratos o borateras, que tienen principalmente Ulexita. Estas borateras se ven afectadas por aguas termales (flechas azul obscuro), y que aportan caudal al río Colpitas. Aguas abajo de las borateras, el Boro puede sufrir sorción, que se ve afectada por los cambios de pH, además se observa el aporte de otros afluentes que generan dilución en el río, aumentando el caudal.

Se pueden observar otros aportes, como la lluvia del invierno altiplánico que si bien es marginal en cuanto a su aporte en caudal, químicamente es un agua limpia que provoca dilución en las concentraciones. En el aumento de caudal pueden ocurrir una o ambas de las situaciones descritas en las imágenes inferiores; material particulado desde el lecho del río puede ser resuspendido, generando que Boro sea incorporado a la columna de agua (como sólido suspendido), o puede ocurrir que en el material suspendido ocurran fenómenos de sorción de Boro que sedimente en el lecho del río y sea arrastrado por el mismo.

5.2.5 Modelación Numérica

La modelación geoquímica numérica del dominio de la cuenca se realizó con el programa PHREEQC for Windows (Parkhurst & Appelo, 2013) se usa un modelo de batch en equilibrio junto con la aplicación mix solutions. Cada input se ajustó a parámetros por Campaña de Terreno y para un promedio de las mismas con los valores históricos. Cada output se comparó con el punto de monitoreo de control.

El software libre del código geoquímico PHREEQC, funciona con bases de datos de reacciones químicas, en estas bases de datos no es posible encontrar todas las reacciones químicas de un sistema en particular, por lo que deben ser revisadas y reformuladas.

En este caso se usó la base de datos llamada wateq4f.dat, en esta base de datos se incluyó la ecuación de disolución de la Ulexita. Como esta constante de disolución no se encontraba en tablas, se obtuvo por los datos de Garcés et al. (2003), con solubilidades expresadas en g de B_2O_3 por cada 100 g de agua:

$$s_{B2O3} = 0{,}492011 - 0{,}0249246T + 0{,}0004535T^2$$

Donde:

s_{B2O3} = solubilidad de Ulexita

T = temperatura a la solubilidad deseada

Así, la solubilidad de la Ulexita a 25°C es de: 0,1523335; con esto se puede obtener la constante de producto de solubilidad:

Se debe cambiar la unidad de la solubilidad a Molar:

$$\frac{0{,}1523335\,g_{B2O3}}{100\,g_{H2O}} \cdot \frac{mol_{B2O3}}{69{,}6202\,g_{B2O3}} \cdot \frac{2\,mol_{Ulexita}}{5\,mol_{B2O3}} \cdot \frac{1{,}005\,g_{H2O}}{1\,mL_{H2O}} \cdot \frac{1000\,mL}{1\,L} = 8{,}796 \cdot 10^{-3} M$$

(sB2O3) (Masa molar de B2O3) (relación molar Ulexita/B2O3) (densidad)

De la reacción de disolución de la Ulexita se debe plantear la constante de producto de solubilidad (K_{ps}), y calcularla:

$$NaCaB_5O_{9(s)} \leftrightarrow Na^{+}_{(ac)} + Ca^{+2}_{(ac)} + B_5O_9^{-3}{}_{(ac)}$$

$$K_{ps} = s_{Na} \cdot s_{Ca} \cdot s_{B5O9} = s^3$$

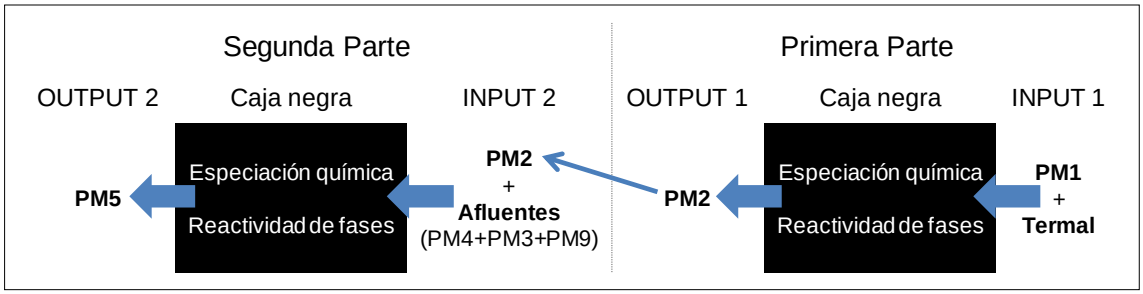
$$K_{ps} = 6{,}805 \cdot 10^{-10}$$

Esta ecuación, escrita como lenguaje de entrada de PHREEQC, fue añadida a la base de datos.

El archivo de entrada para la modelación de PHREEQC se encuentra en INPUT 1, en el Anexo F, Sección 10.6.1. Describe como disoluciones los puntos de monitoreo PM1 que está en Colpitas antes de las borateras, y el punto de monitoreo Termal. El input además indica una mezcla según el porte de caudales de cada una de las disoluciones equilibradas con su especiación más probable.

El output de esta etapa es el agua que se encuentra en PM2. Este output se encuentra en OUTPUT 2, en el Anexo F, Sección 10.6.1. Para la segunda parte de la modelación se tomaron los valores del resultado de la primera etapa de la modelación y se mezcló con aguas con características de afluentes. El código de input se encuentra en INPUT 2 en el Anexo F, Sección 10.6.1. El output de esta etapa de la modelación corresponde al punto de monitoreo PM5. La Figura 5-6 muestra las etapas de la modelación:

Figura 5-6: Etapas de la modelación



Fuente: Elaboración propia.

Con esta última etapa de la modelación el OUTPUT 2 que se encuentra en el Anexo F, Sección 10.6.1. Un resumen de las especies principales se muestra en la Tabla 5-6:

Tabla 5-6: Resultados principales de la segunda parte de la modelación numérica

Elemento	Especie principal	Concentración (molal)
Arsénico	H_3AsO_3 (As (III))	1,396e-02
Boro	H_3BO_3	1,645e-02
Carbono	HCO_3^-	6,592e-03
Calcio	Ca^{+2}	3,682e-03
Cloro	Cl^-	7,774e-02
Cobre	$CuCl_2^-$ (Cu (I))	5,190e-07
Hierro	Fe^{+2}	4,498e-06
Potasio	K^+	5,631e-03
Magnesio	Mg^{+2}	1,405e-03
Sodio	Na^+	7,728e-02
Azufre	SO_4^{-2}	1,483e-03

La muestra que en cuanto a la especiación, al tratarse de un agua moderadamente reductora, el Arsénico presente, se encuentra en su mayoría como Arsénico (III), formando su oxoácido más simple,

En cuanto al Boro, de acuerdo a la base de datos, la especie más probable el ácido bórico, dado el pH de la columna de agua, Para otros elementos o compuestos como el Azufre, si bien se encuentra sulfuro en muy poca concentración, es el sulfato la especie dominante,

En cuanto a las distintas fases, se observa que todos aquellos minerales con un Índice de Saturación (SI en el output) con valores negativos se están disolviendo como la Ulexita, Halita, y Atacamita, Mientras que los minerales con un SI positivo están precipitando, como el caso de Calcita, Goetita, Hematita, y Magnetita,

En un paso posterior para la modelación numérica se añadirán reacciones de superficie, preferentemente fenómenos de sorción sobre óxidos de Hierro amorfo que pueden disminuir las concentraciones de algunos elementos o compuestos de la columna de agua.

5.2.6 Diagrama Causa-Efecto

El análisis Causa-Efecto se refiere al origen de las concentraciones de Boro, Calcio, Potasio, Sodio, Sulfato, Cloruros y Sólidos Totales Disueltos en el agua de la Cuenca del río Colpitas. El monitoreo realizado ha entregado información relevante sobre estos contaminantes naturales, lo que también se observa en los respectivos balances hidroquímicos. A partir de esta información además del conocimiento de la química natural es posible establecer cadenas causales que originan las concentraciones encontradas en las aguas del Valle del Colpitas.

Para disponer de una mejor visión de estas relaciones causa-efecto se ha optado por utilizar como referencia los diagrama Ishikawa, que consideran una representación gráfica en la que pueden identificarse los sitios según su aporte a la concentración del elemento respectivo. Atendiendo a que existe semejanza entre el diagrama hídrico unifilar de la cuenca y la representación Ishikawa, se ha optado por utilizar como base este unifilar.

La identificación de las causas es un paso esencial para la construcción de este diagrama. Una causa debe relacionarse ya sea en términos positivos (aumentos) o negativos (disminución) del efecto. Cabe señalar que el diagrama Ishikawa es una representación simple de una sola vía, no admite retroalimentación como lo hacen los diagramas dinámicos de Forrester, pero tiene su interés cuando se trata de fenómenos de flujo y transporte de contaminantes donde no existan vueltas atrás de las corrientes, como es el caso de Colpitas.

Para identificar las causas se consideran entre otros los siguientes fenómenos:

- Presencia de aguas de distinto origen, en este caso se tienen aguas subterráneas de borateras y aguas superficiales en quebradas.
- Química natural con presencia de distintas especies, con concentraciones determinantes de fenómenos que expliquen la presencia de elementos químicos.
- Condiciones ambientales favorables a ciertas reacciones químicas, entre ellas la temperatura, el pH y factores climáticos.
- Variación de concentraciones a través del tiempo, que puedan relacionarse con los factores citados.
- Calidad del suelo o la roca existente en los lugares donde afloran aguas, efectos de lixiviación, adsorciones y fenómenos de carácter físico-químicos.

5.2.7 Diagramas Causa-Efecto en Colpitas

Para el análisis causa-efecto se optó por seleccionar siete parámetros cuyas concentraciones muestran el efecto de las borateras y de las condiciones químicas del Valle del río Colpitas. Estos parámetros son los siguientes:

- Boro (B)
- Calcio (Ca)
- Potasio (K)
- Sodio (Na)
- Sulfato (SO_4)
- Cloruros (Cl^-)
- Sólidos Totales Disueltos
- Arsénico

Estos parámetros muestran variaciones de concentración significativas que pueden explicarse en relación a la disolución de la Ulexita en el proceso geotérmico de las borateras. A continuación se analizan cada uno de estos parámetros.

- Boro: Los resultados analíticos de la medición de este parámetro muestran que todas las corrientes tienen algún grado de concentración de Boro, incluido en río Lluta y las corrientes que conforman la red hídrica de Colpitas. El rango de resultados es bastante amplio, cubriendo desde valores trazas hasta más de 50 mg/L. La corriente que muestra este alto nivel de concentración está identificada a través del punto de muestreo N°2 (PM2), que corresponde a la salida de la boratera, lo que ratifica la hipótesis que este lugar es la fuente principal de aporte de este elemento, siendo generada por la afluencia de aguas subterráneas termales.

- Calcio: Este elemento está presente en toda la Cuenca del Colpitas y adicionalmente en el río Lluta, en concentraciones similares, lo que se explica por la base geológica. El Calcio está formando parte de diversas formas minerales que se lixivian y aumentan las concentraciones en los recursos hídricos de la cuenca. Pese a lo anterior, existe una mayor concentración en PM2, lo que se explica porque forma parte de la Ulexita.

- Potasio: En forma similar al Calcio se observa que este elemento está en toda la cuenca en cantidades cercanas a 5 mg/L, siendo mayor su contenido en el PM2 como consecuencia de las borateras. En el punto 5 (PM5) la concentración se mantiene alta, lo que se atribuye al efecto aguas abajo del PM2.

- Sodio: El Sodio es un elemento principal que forma parte de varios compuestos minerales presentes en la cuenca. Todos los valores en los distintos puntos de medición son relativamente altos, siendo su rango desde 20 hasta 900 mg/L. Los valores más altos se encuentran en la salida de las borateras, lo que como otros elementos, es inmediata consecuencia de que este elemento forma parte estructural de la Ulexita.

- Sulfato (SO_4): Las concentraciones de sulfato de Colpitas son siempre inferiores a las que se registran en el río Lluta, lo que es clara consecuencia del efecto del río Azufre. El rango de valores en Colpitas es desde 23 hasta 388 mg/L, este último corresponde a PM2, mostrando la importancia del efecto de las borateras.

- Cloruros (Cl^-): El valor máximo corresponde a PM2 alcanzando 1.481 mg/L, lo que se diferencia nítidamente del resto de los puntos de muestreo. Este parámetro forma parte de la Ulexita.

- Sólidos Totales Disueltos: Los STD que se observan corresponden a los iones que se han traspasado al agua en las borateras, producto de la lixiviación a alta temperatura. Ellos resumen todo el fenómeno de solubilidad iónica. Los altos valores en PM2 muestran que el efecto en la calidad de aguas de las borateras es muy significativo, lo que también se ve expresado en PM5.

- Arsénico: El aporte principal de Arsénico en la cuenca del río Colpitas se produce en el punto Termal, localizado en las borateras, alcanzando el valor máximo de 9,75 mg/L. Como consecuencia, los valores de concentración registrados en los puntos PM2 y PM5 son también altos, respecto de la concentración en los otros puntos analizados. Las aguas de mejor calidad química incorporada por quebradas aportantes producen un efecto de dilución. La concentración de este elemento en las aguas del río Caracarani promedia 0.1mg/L.

La Figura 5-7 muestra una síntesis de los valores de concentración química de los elementos principales para los puntos de muestreo analizados, para todas las campañas. Aquellos gráficos que tienen un cuadrado rojo en la su esquina superior derecha tienen una escala diferente en el eje vertical en relación a los otros gráficos de la serie del mismo elemento.

Figura 5-7: Concentración química en el agua de los elementos principales.

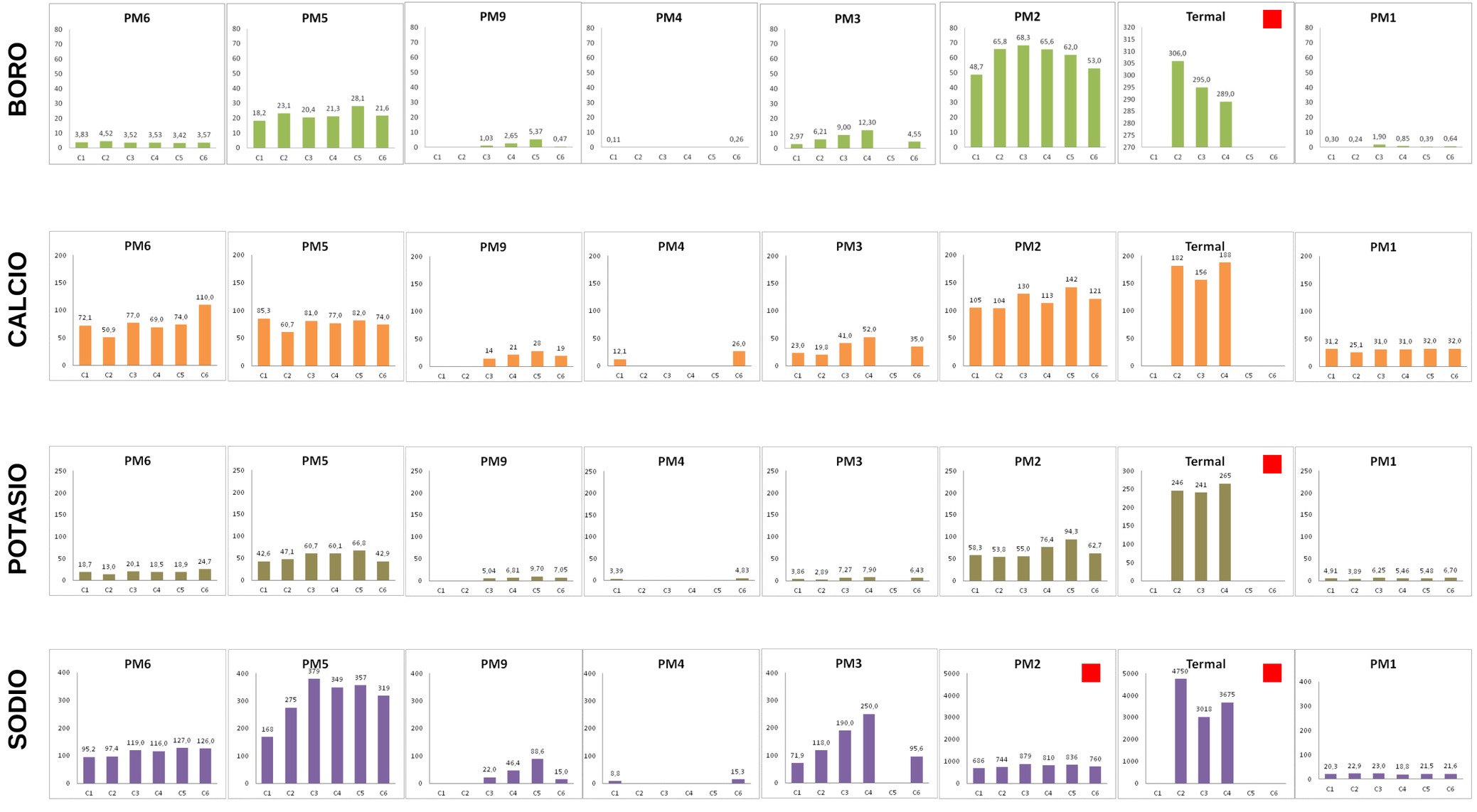


Gráfico con cambio de escala en el eje vertical respecto del resto de la serie del elemento

Figura 5-7: Concentración química en el agua de los elementos principales. (Continuación).

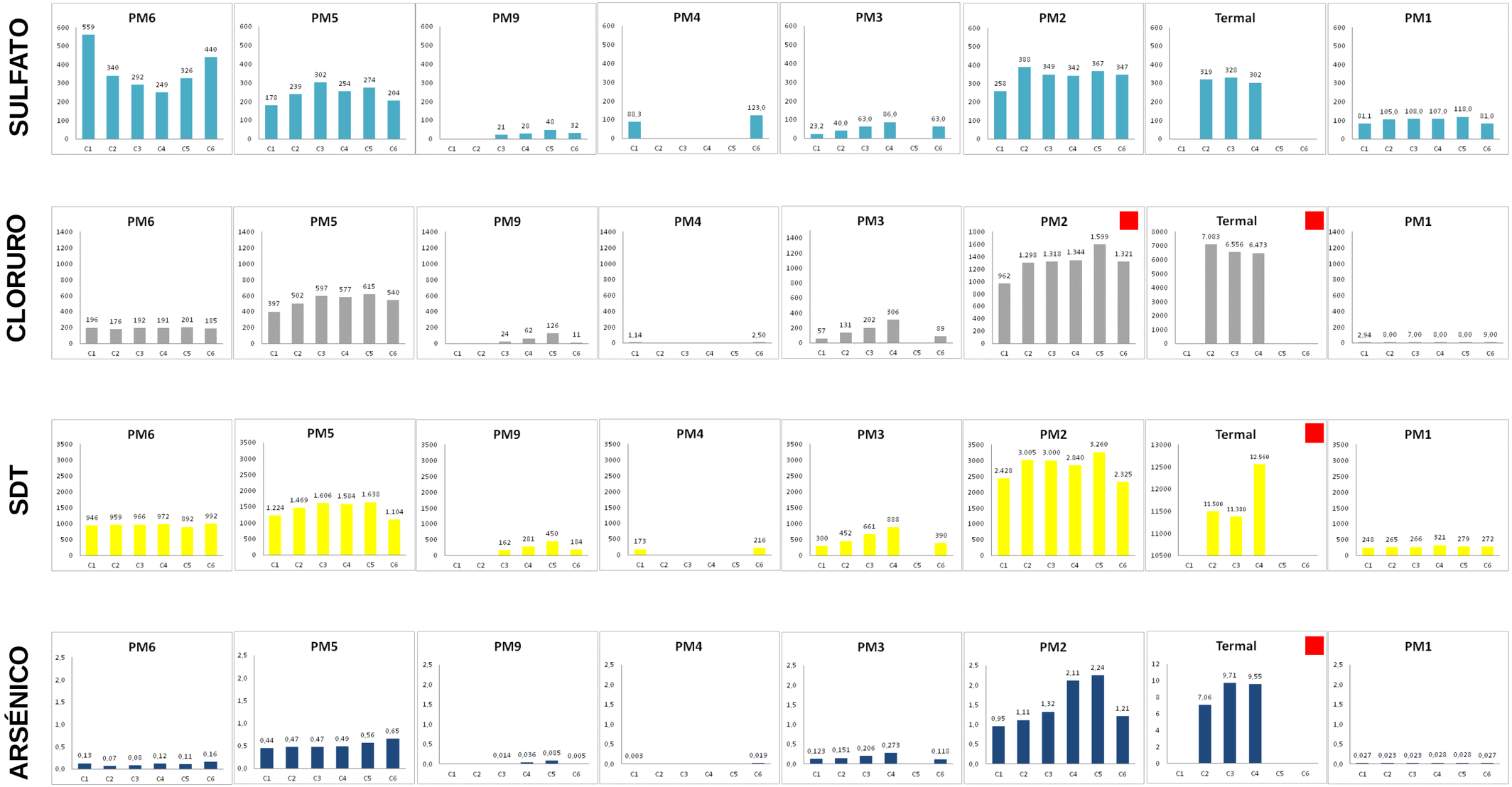


Gráfico con cambio de escala en el eje vertical respecto del resto de la serie del elemento

5.2.8 Distribución Espacial de Elementos Principales

Según los resultados obtenidos la concentración de los distintos elementos analizados no responde a un patrón de distribución homogéneo. Sí se evidencia el efecto de las borateras como origen de elementos que se presentan en altas concentraciones, en algunos casos, concentraciones extremas.

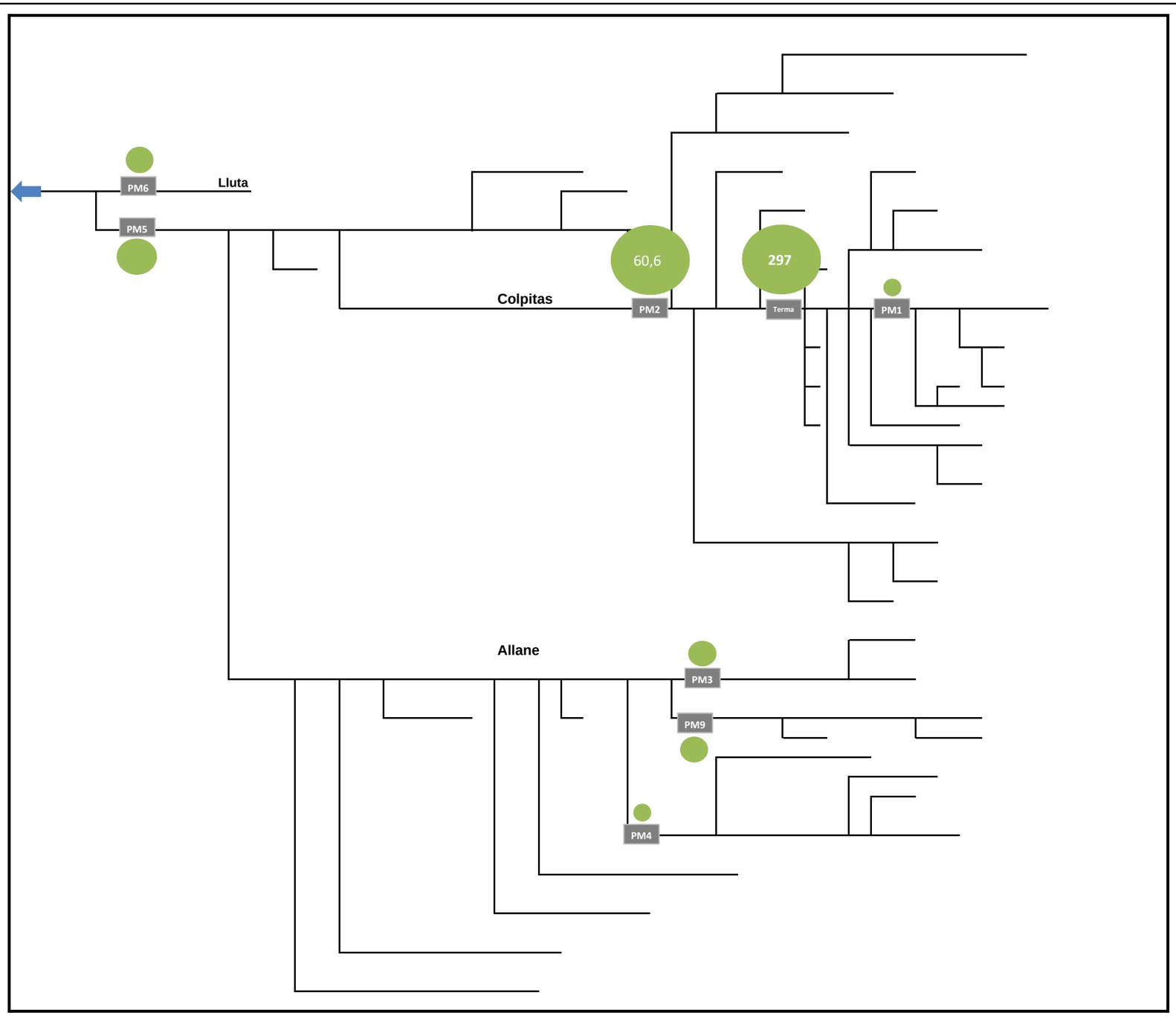
A continuación la Figura 5-8 a Figura 5-15 representan para cada uno de los puntos de muestreo analizados las concentraciones medias obtenidas a partir de las campañas 1, 2, y 3. Para los resultados que superan el último y mayor rango de la simbología se insertó el valor máximo registrado a la fecha.

Al establecer una relación y análisis espacial respecto de la concentración de los elementos químicos principales presentes en las aguas superficiales, las borateras constituyen el área donde se produce un aumento considerable de los elementos Boro, Calcio, potasio, Sodio, sulfato, cloruro, y SDT, es decir, la totalidad de los considerados elementos principales.

En el caso de los elementos Boro, Sodio, cloruro, y SDT el aporte de las borateras a la alta concentración se mantiene en el punto de monitoreo PM2, aguas debajo de la boratera. En el punto de monitoreo PM5 esta influencia se ve neutralizada; se entiende que el aporte de las quebradas menores que descargan sus aguas (bajas en concentración de elementos) al río Colpitas, generando una dilución de los elementos y una mejora relativa en la calidad química del agua.

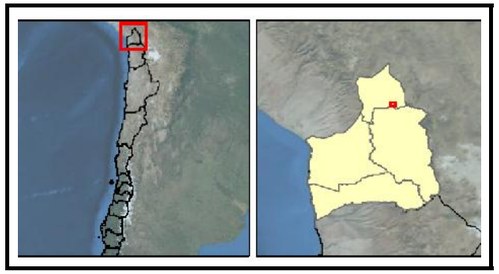
En el caso de los sulfatos, si bien las borateras constituyen un área donde se genera un marcado aumento de la concentración, cuyo registro máximo es de 388 mg/L, aguas abajo, el efecto de este proceso se ve contrarrestado por el aporte de las quebradas menores y, por tanto, se circunscribe a la Cuenca del río Colpitas, en cuya salida (PM5) se registra una concentración media de 240 mg/L. Sin embargo, las aguas caracterizadas en el punto PM6 presentan una alta concentración de este elemento la cual se debe a los aportes de los ríos Azufre y Caracarani.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco



Leyenda

- < 1 mg/l
- 1-10 mg/l
- 10,1- 25 mg/l
- 25,1 - 50 mg/l
- > 50 mg/l



TÍTULO:

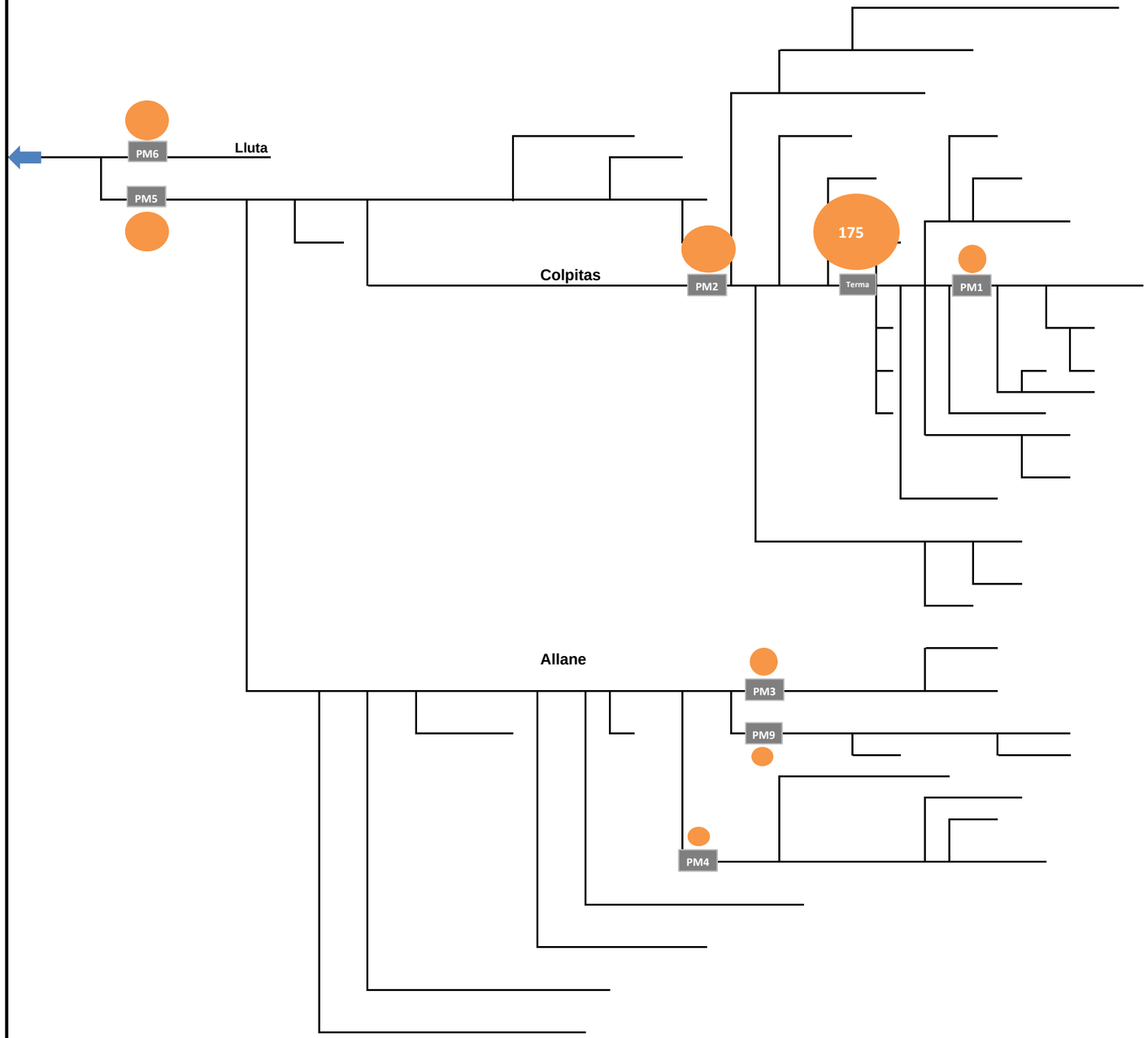
Diagrama Causa - Efecto:
Concentración Media de Boro

PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

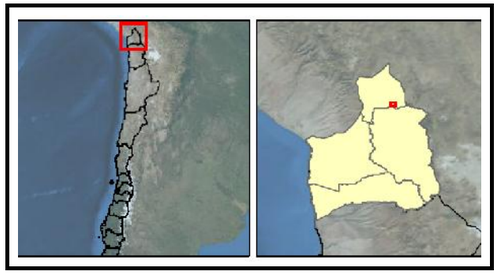
PREPARADO POR:	CLIENTE:
amec	Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-8



Leyenda

- 0-25 mg/l
- 25,1 - 50 mg/l
- 50,1 - 100 mg/l
- 100,1 - 150 mg/l
- > 150 mg/l



TÍTULO:

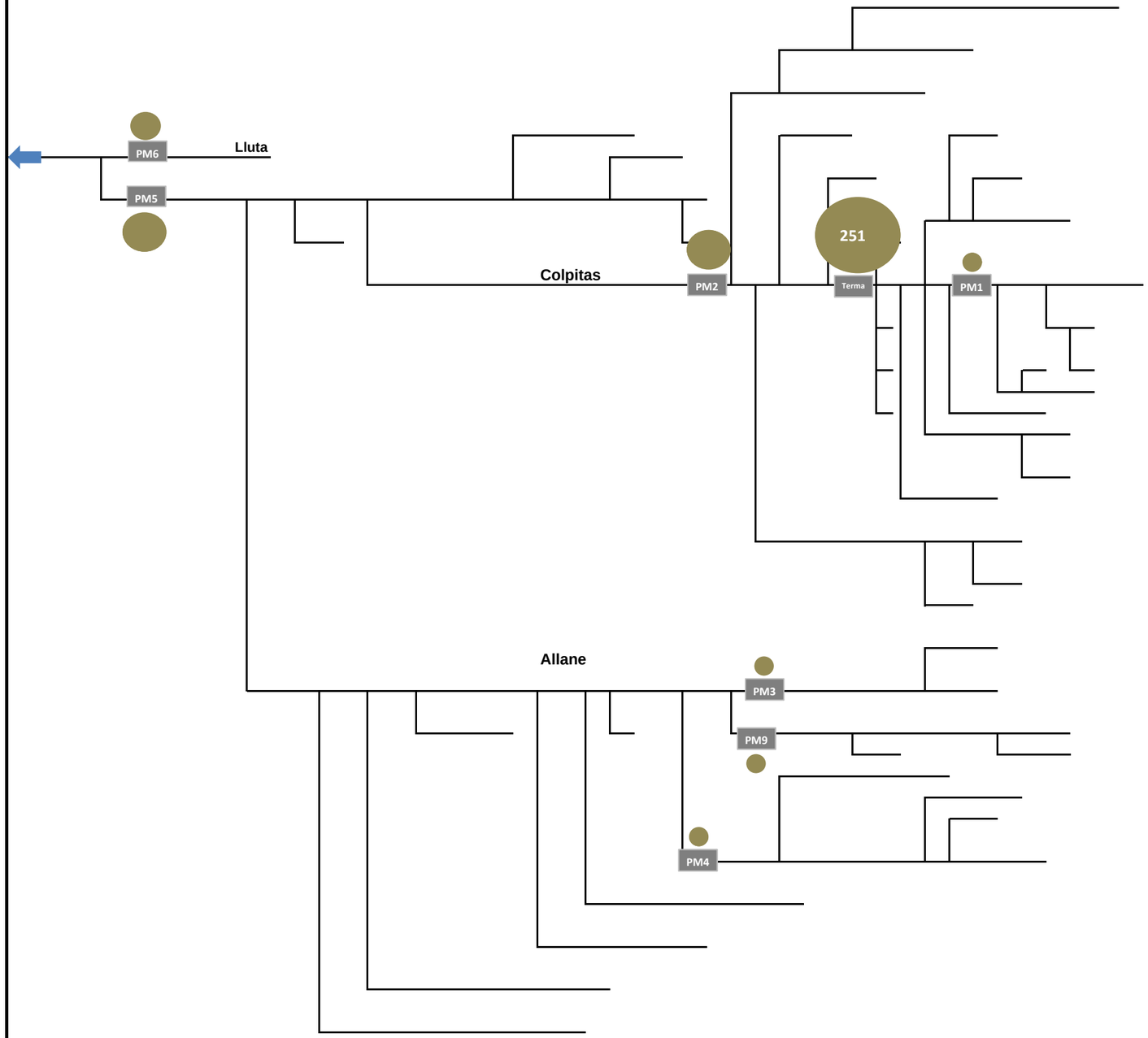
Diagrama Causa - Efecto:
Concentración Media de Calcio

PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

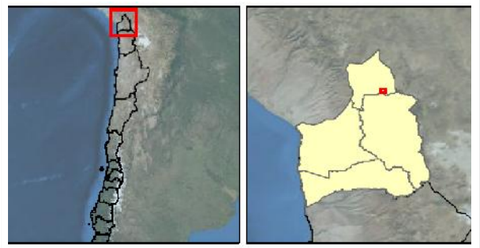
PREPARADO POR:	CLIENTE:
amec	Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-9



Leyenda

- < 10 mg/l
- 10,1-50 mg/l
- 50,1-100 mg/l
- 100,1 - 150 mg/l
- > 150 mg/l



TÍTULO:

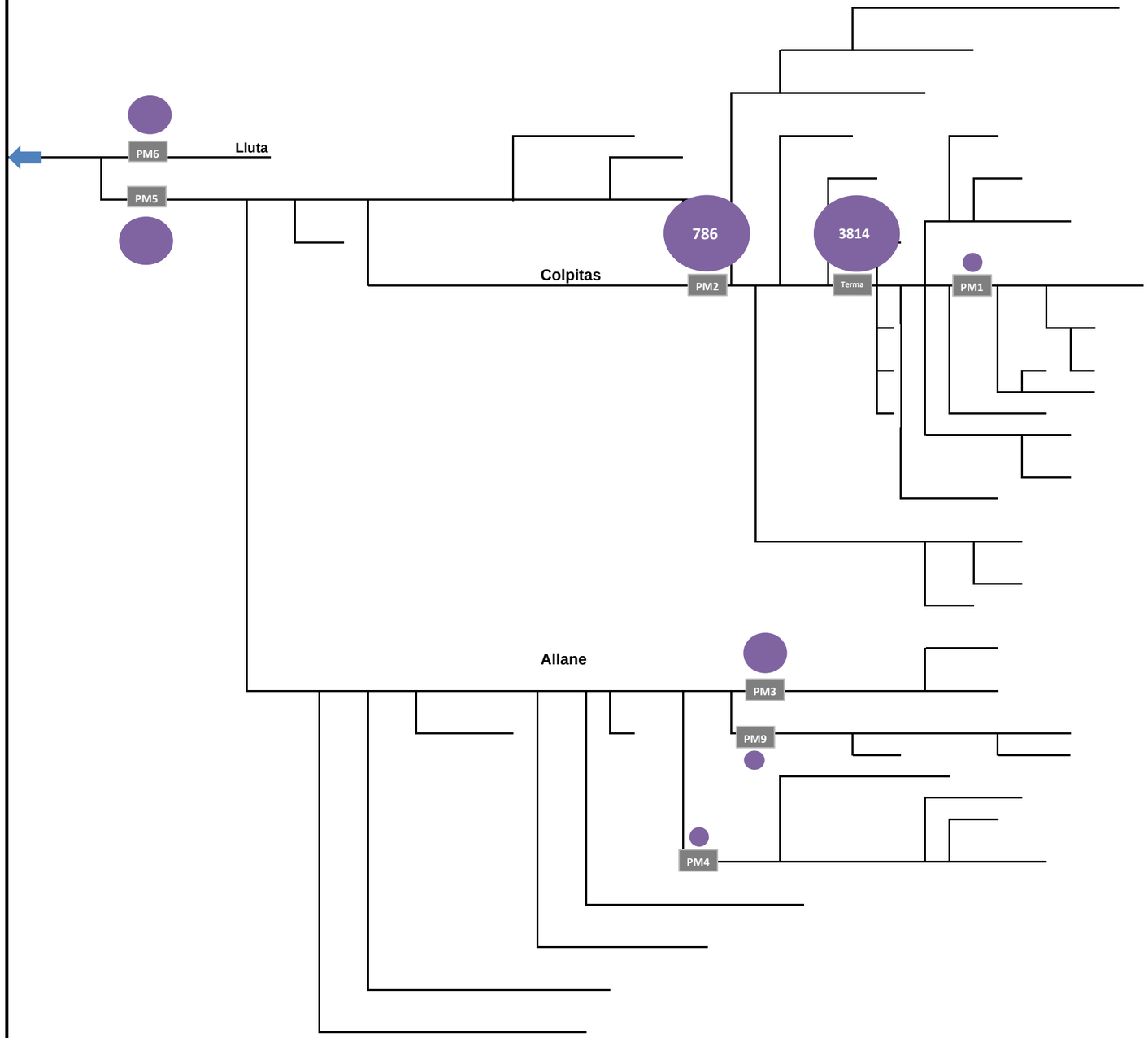
Diagrama Causa - Efecto:
Concentración Media de Potasio

PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

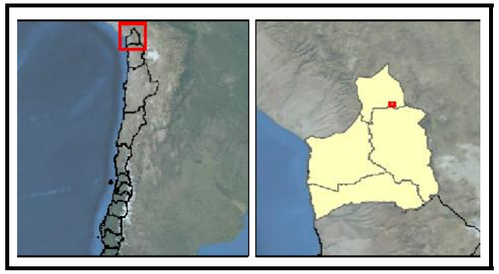
PREPARADO POR:	CLIENTE:
amec	Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-10



Leyenda

- < 50 mg/l
- 50,1 - 100 mg/l
- 100,1 - 250 mg/l
- 250,1 - 500 mg/l
- > 500 mg/l



TÍTULO:

Diagrama Causa - Efecto:
Concentración Media de Sodio

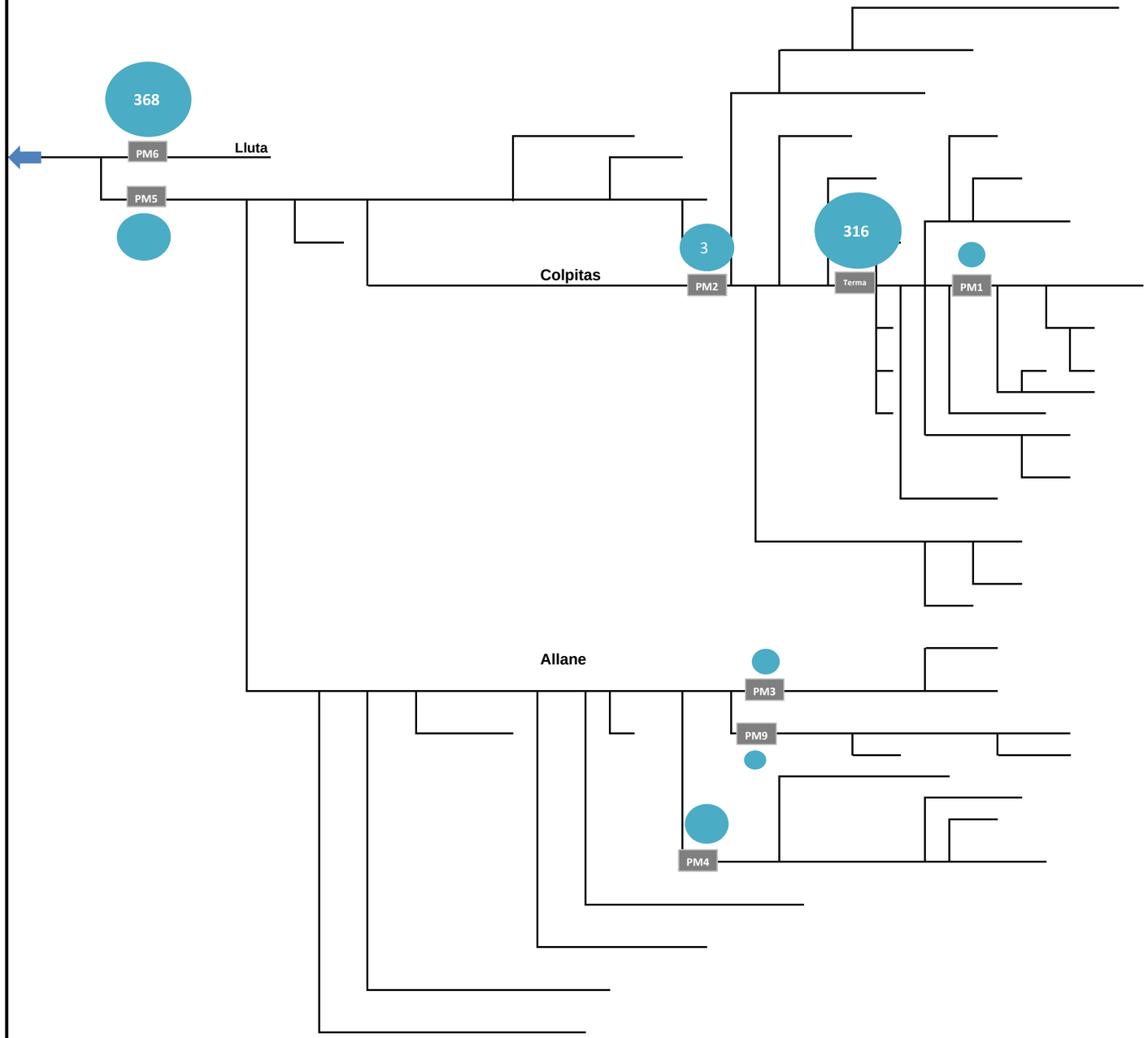
PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

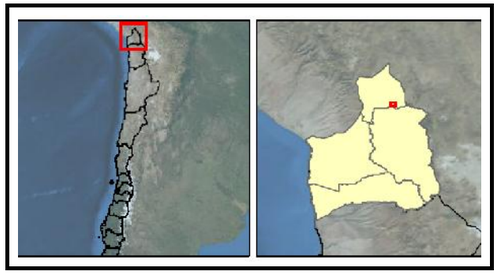
CLIENTE: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-11



Leyenda

- < 50 mg/l
- 50,1 - 100 mg/l
- 100,1 - 250 mg/l
- 250,1 - 350 mg/l
- > 350 mg/l



TÍTULO:

Diagrama Causa - Efecto:
Concentración Media de Sulfato

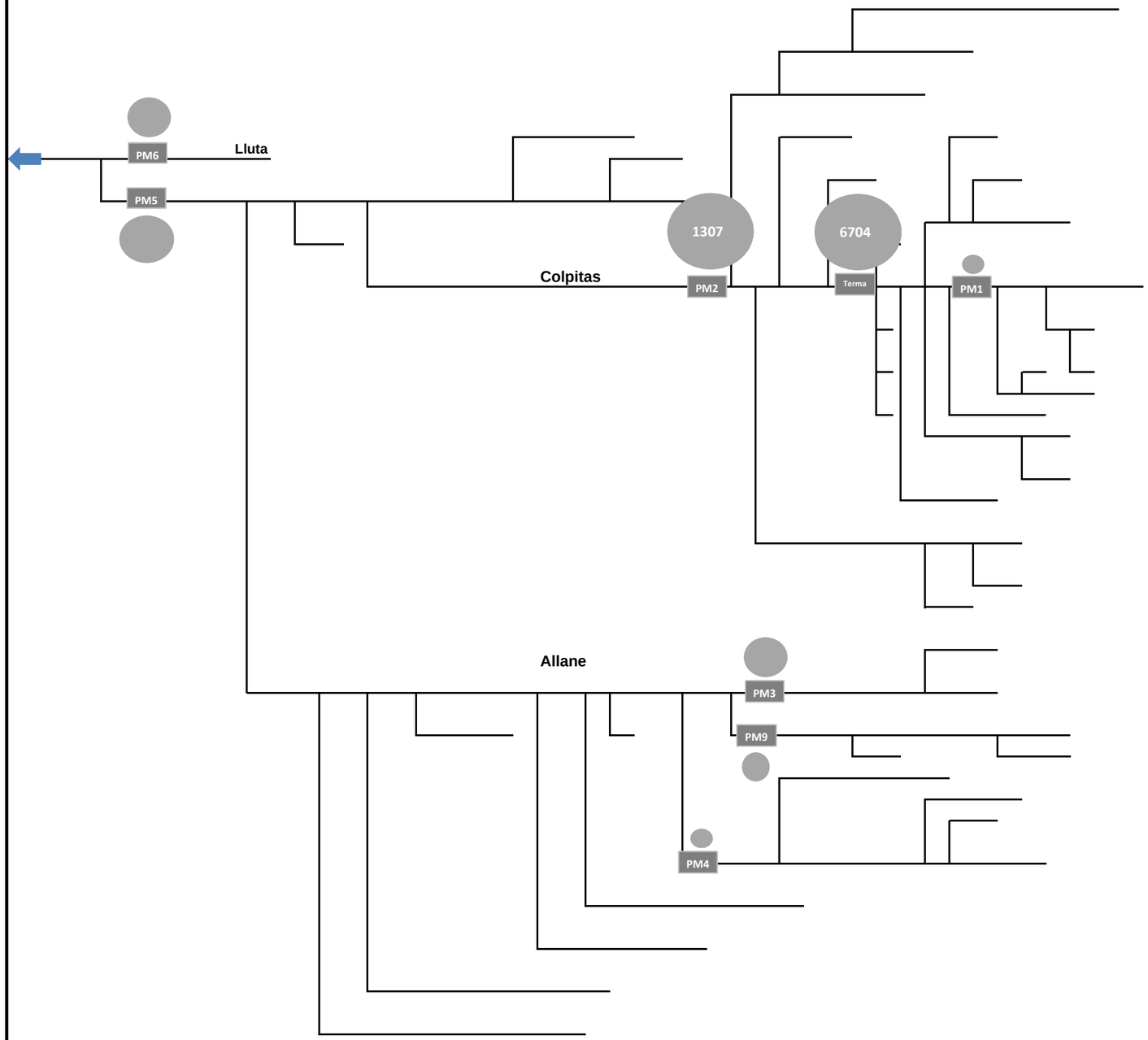
PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

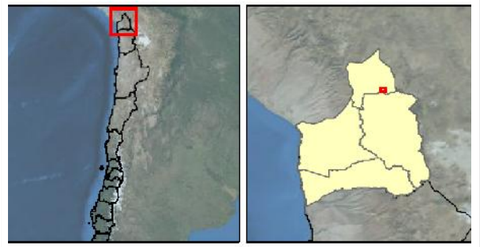
CLIENTE: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-12



Leyenda

- < 10 mg/l
- 10,1-100 mg/l
- 100,1-500 mg/l
- 500,1 - 1000 mg/l
- > 1000 mg/l



TÍTULO:

Diagrama Causa - Efecto:
Concentración Media de Cloruro

PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

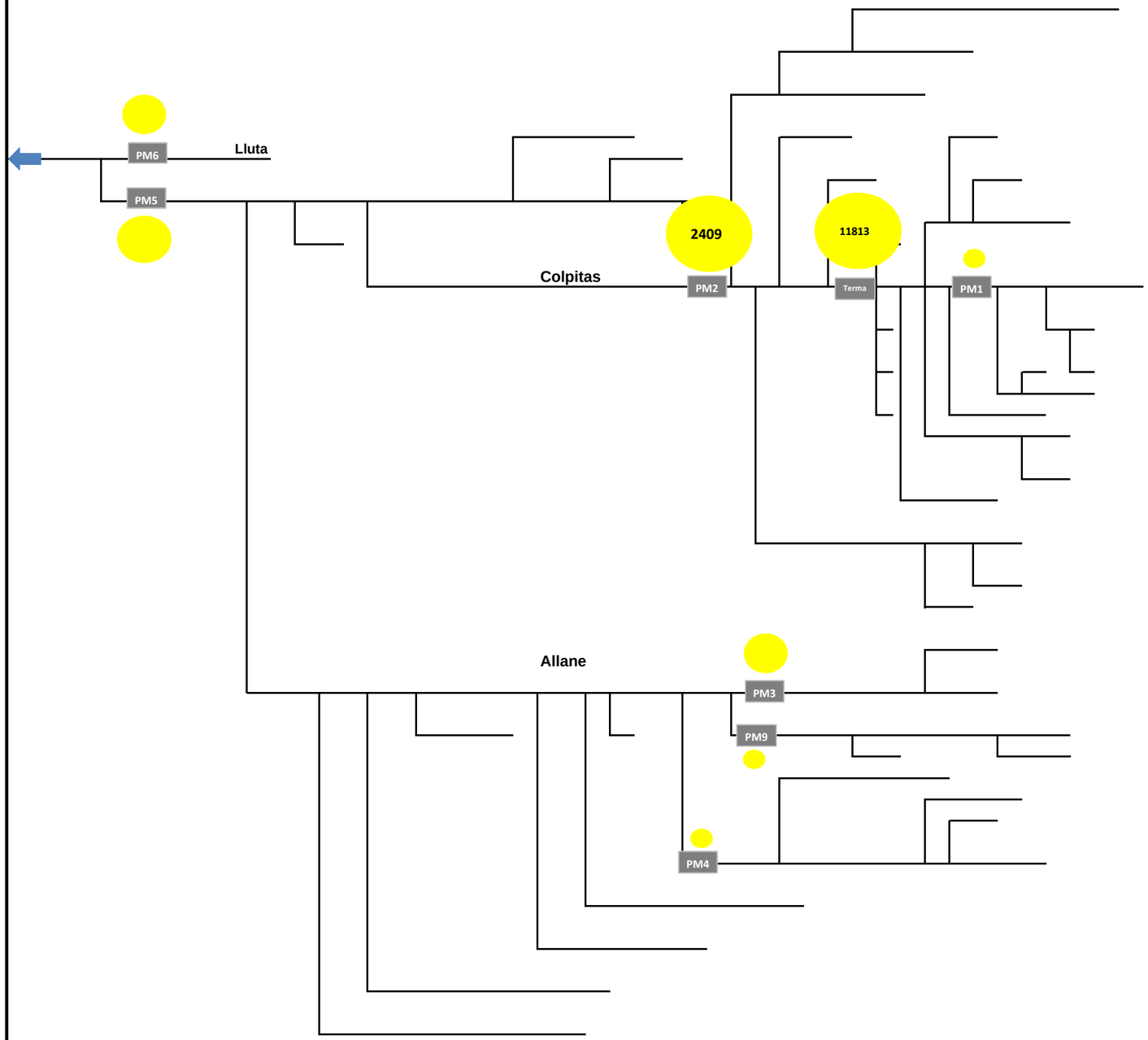
PREPARADO POR:

amec

CLIENTE:

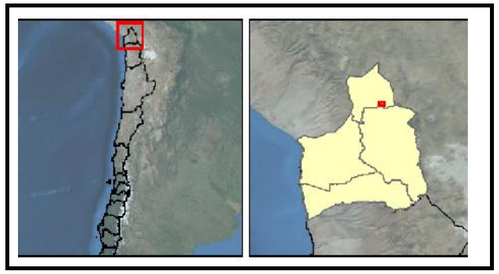
Dirección General de Aguas
Ministerio de Obras Públicas
Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-13



Leyenda

- < 250 mg/l
- 250,1-500 mg/l
- 500,1-1000 mg/l
- 1000,1 - 1500 mg/l
- > 1500 mg/l



TÍTULO:

Diagrama Causa - Efecto:
Concentración Media Sólidos Disueltos Totales

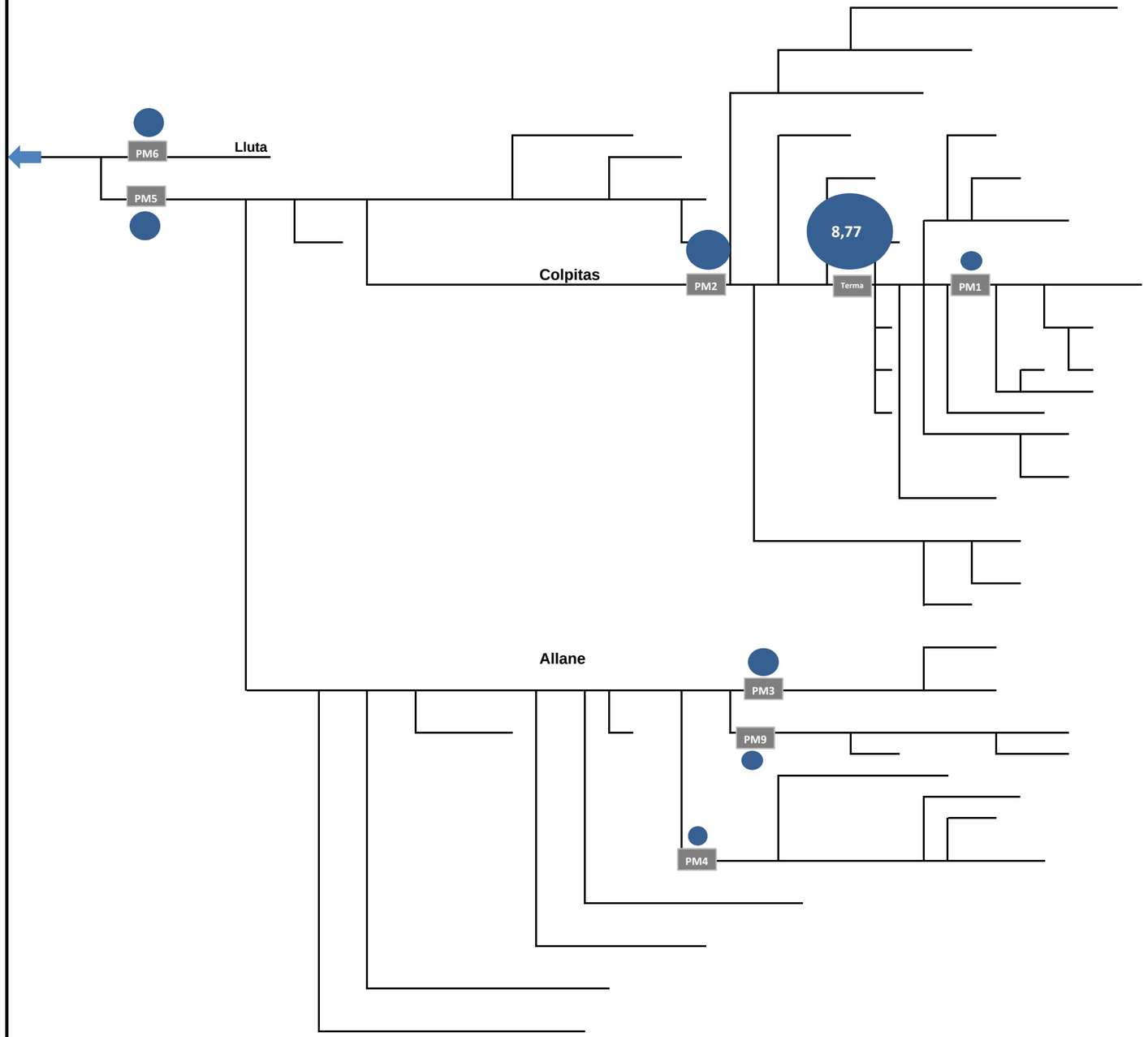
PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

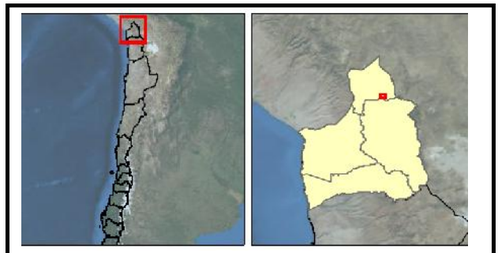
CLIENTE: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-14



Leyenda

- < 0,1 mg/l
- 0,1-1 mg/l
- 1- 2,5 mg/l
- 2,5 - 5 mg/l
- > 5 mg/l



TÍTULO:

Diagrama Causa - Efecto:
Concentración Media de Arsenico

PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR:	CLIENTE:
amec	Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	5-15

5.3 Modelo Conceptual Hidrogeológico

5.3.1 Marco Geológico

El área de la Cuenca Colpitas se encuentra en el sector norte de la Región de Arica y Parinacota, Chile en altitudes entre aproximadamente 3.600 m y 5.450 m en la Cordillera de los Andes. La roca más vieja en la cuenca es la Formación Lúpica, que es una sucesión volcánica y sedimentaria continental de edad Oligoceno-Mioceno. Luego, procesos orogénicos plegaron la formación. La geología del lecho rocoso regional está dominada por roca volcánica de edad Mioceno y Plioceno. Estas rocas incluyendo centros y complejos volcánicos, remanentes de volcanes, flujos de lava, domos y conos, depósitos piroclásticos, ignimbritas, y epiclásticos, tufa, y tefra. Más adelante, sedimentos no consolidados de edades Plioceno-Holoceno han sido depositados, incluyendo los tipos de piedemonte, aluvial, lacustre, eólica, glacial, coluvial, palustre, y bofedal.

5.3.2 Geología Estructural de Lecho Rocoso

De acuerdo con un perfil esquemático (sección transversal) en el sector oriente de la cuenca elaborado por Sernageomin (2012), existen pliegues amplios en la Formación Lupica (sucesión volcánica y sedimentaria continental) que han sido erosionados y que tienen rumbo predominante desde el noroeste hasta el sureste. Los pliegues incluyen anticlinales y sinclinales, y algunos de los pliegues son buzante.

Las fallas se han mapeado en una región este y noreste de la cuenca (Sernageomin, 2012), y una falla inversa está ubicada al suroeste de la cuenca (Sernageomin, 2004). Sin embargo, aunque la sección transversal parece para indicar que hay fallas en el lecho rocoso (Formación Lupica; Sernageomin, 2012), ninguna falla fue mapeada en el superficie dentro de la Cuenca Colpitas.

AMEC observó evidencia de algunas diaclasas en el lecho rocoso (por ejemplo, en Perfil #1 de la campaña geofísica). Pero no se encontró más información sobre la índole, profundidad, ni la orientación de las diaclasas. Además, no se encontró información detallada sobre la estratigrafía de la Formación Lúpica, otras unidades sedimentarias, ni las capas volcánicas. Generalmente, las estructuras del lecho rocoso puede que formar rutas para el flujo de aguas subterráneas debido a porosidad secundaria. Sin embargo, no es conocido si esas estructuras son importantes para controlar el flujo de agua en la Cuenca Colpitas.

5.3.3 Depósitos Consolidados y Unidades Hidroestratigráficas

El mapa hidrogeológico de Chile (DGA, 1986) identifica dos tipos generales de roca consolidada como sigue. Un grupo consiste en rocas sedimentarias y volcánicas Cretácico-Terciario cuales tienen muy baja importancia hidrogeológica, y su

permeabilidad es muy baja. El otro grupo es Terciario-Cuaternario, es generalmente volcánico, y las rocas son fracturadas. Este segundo grupo tiene porosidad secundaria; por eso, la unidad tiene baja a alta importancia hidrogeológica. Es importante recordar que, porque el mapa del DGA (1986) tiene una escala pequeña, las descripciones de las unidades son muy generales.

Se puede encontrar más información en el mapa geológico de Chile (Sernageomin, 2003), aunque la escala también es pequeña. Las unidades geológicas aparecen más abajo con sus símbolos en el mapa y sus edades. Es posible que, dentro de estas unidades, haya rocas no consolidadas (por ejemplo, algunos de los depósitos piroclásticos). Sin embargo, por simplicidad presentamos todas las rocas volcánicas como unidades consolidadas.

- P3i – centros volcánicos: lavas, domos, y depósitos piroclásticos andesiticos y daciticos; conos piroclasticos y lavas andesíticas y basálticas (Plioceno)
- Ms3i – centros y secuencias volcánicas: lavas, domos, y depósitos piroclásticos; andesiticos y daciticos (Mioceno Superior)
- OM2c – secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a daciticas; rocas epiclasticas y piroclasticas (Oligoceno-Mioceno)
- Q3i – estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos, y depósitos piroclásticos andesitico-basalticos a daciticos; calcoalcalinos (Cuaternario)
- P3t – depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados (Plioceno)

Más recientemente, Sernageomin (2012, 2004) ha producido mapas geológicos de la Región de Arica y Parinacota. De acuerdo con el mapa que incluye la porción sur de la cuenca (Sernageomin, 2004) se puede identificar las siguientes unidades geológicas:

- Sur-oeste: Pampas Cascachane y Allane, y Los Nevados de Putre: volcanes y centros eruptivos (depósitos de flujo piroclástico; lava andesíticas y daciticas; domos)
- Sur-oriente: Ignimbrita Lauca (toba de ceniza y lapilli, vítrea y cristalina, con pómez y líticos, de composición riolítica); volcanes del Plioceno y Mioceno Superior
- Formación Lupica que es una sucesión volcánica y sedimentaria continental

En la porción centro-oeste de la cuenca, se consideran unidades geológicos como lo siguiente (Sernageomin, 2012):

- Pampas Colpitas, Guata, Allane, Curaguara, y Cascachane: Complejos volcánicos (Pleistoceno). Depósitos de flujo piroclástico y depósitos de avalancha de detritos.
- Las Quebradas Colpitas y Allane: Ignimbrita Lauca

Con respecto las áreas centro-oriente y norte de la Cuenca Colpitas, se puede identificar las siguientes unidades geológicas (Sernageomin, 2012):

- Centro-oriente
  - Remanentes de volcanes del Mioceno medio
  - Formación Lupica
  - Ignimbrita Lauca
- Norte
  - Complejos volcánicos Churicagua y Copatanca; Lomas Milluncirca y Vichonasa: volcanes y complejos volcánicos (lavas andesíticas y daciticas; domos daciticos)
  - Pampa Guañavinto: remanentes de volcanes del Plioceno

Basado en la información disponible de la geología presentada más arriba, AMEC identificó ocho unidades geológicas de depósitos consolidados en la zona de Colpitas. Una unidad hidroestratigráfica es una formación geológica, un grupo de formaciones o parte de una formación que puede distinguirse en base a su capacidad de producir y trasmitir agua. Los litologías principal pueden ser consideradas diferentes unidades hidroestratigráficas (Tabla 5-7). Juntas, estas unidades controlan el flujo de agua subterránea en los depósitos consolidados. Pero, hay que recordar que no hay muchos datos disponibles sobre las características hidrogeológicas de la cuenca, y por eso, la información en la Tabla 5-7 debe ser considerada preliminar.

Tabla 5-7: Unidades Hidroestratigráficas (Depósitos Consolidados) de la Cuenca Colpitas.

Categoría Geológica	Unidad Hidroestratigráfica	Tipo Probable de Acuífero	Importancia Hidrogeológica
Roca solida o profunda /lecho rocoso	Estratovolcanes, complejos volcánicos, domos, y conos	Confinado a semi-confinado	Baja
	Lavas	Confinado a semi-confinado	Baja
	Formación Lúpica	Confinado a libre	Baja a media
Roca fracturada, meteorizada, o parcialmente consolidada	Conos y Depósitos Piroclásticos	Confinado a libre	Baja a media
	Secuencias volcanosedimentarias	Confinado a semi-confinado	Baja a alta
	Rocas epiclasticas	Semi-confinado a libre	Baja a alta
	Ignimbrita Lauca	Semi-confinado	Baja a media
	Remanentes de volcanes	Confinado a libre	Baja a media

5.3.4 Depósitos no Consolidados y Unidades Hidroestratigráficas

Varias formaciones no consolidadas están arriba de las secuencias de lechos rocosos y generalmente tienen una importancia más alta con respecto al flujo de agua subterránea. Estos depósitos forman acuíferos superficiales en la zona de la Cuenca Colpitas. Las formaciones no consolidadas que dominan el área de estudio son: sedimentos de piedemonte, aluviales/fluviales, lacustres, eólicas, glaciales, coluviales, bofedales, y palustres. La DGA (1986) identifico depósitos de edad Cuaternario no consolidados como relleno con media a alta importancia hidrogeológica y porosidad primaria. Adentro de estas unidades, se puede encontrar rocas consolidadas (por ejemplo, conglomerados, areniscas, limolitas, y arsillolitas). Sin embargo, por simplicidad presentamos todas las rocas más jóvenes como unidades no consolidadas.

El mapa geológico de Chile (Sernageomin, 2003) identificó cuatro tipos de sedimentos no consolidados como siguiente (con sus símbolos y edades):

- Qa – depósitos aluviales, coluviales, y lacustres: gravas, arenas, y limos (Pleistoceno-Holoceno)

- Q1g – depósitos morrénicos, fluvioglaciales, y glacilacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla; gravas, arenas, y limos (Pleistoceno-Holoceno)
- MP1c – Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales/fluviales, o coluviales; conglomerados, areniscas, y limolitas (Mioceno Superior-Plioceno)
- PPI1c – conglomerados, areniscas, limolitas, y arsillolitas, generalmente consolidados (aluviales, lacustres, y eólicas) (Plioceno-Pleistoceno)

Con escalas más grandes, los mapas de Sernageomin (2012, 2004) muestran las siguientes formaciones no consolidadas:

- Pampas Churicagua y Guañavinto
  - Formación Visviri: gravas, areniscas, y limolitas; fluviales y lacustres.
  - Depósitos fluviales y aluviales
- La porción norte de la cuenca
  - Depósitos glaciares (brechas sedimentarias, gravas, y limos)
- La parte centro-oriente de la cuenca
  - Formación Visviri
  - Depósitos fluviales y aluviales
  - Depósitos palustres – limos con materia orgánica
- El área centro-oeste de la cuenca
  - Las Quebradas Colpitas y Allane: depósitos aluviales y fluviales (gravas, arenas, y limo); depósitos coluviales (gravas y arenas).
  - Desembocadura de la cuenca: Formación Huaylas (Mioceno) – Gravas, areniscas, y arcillolitas (fluviales)
- La porción sur-este de la cuenca
  - Depósitos glaciales (brechas sedimentarias, gravas, y limos); depósitos palustres (limos con materia orgánica).

Basado en la información disponible, AMEC identificó cinco unidades geológicas de depósitos no consolidados en la Cuenca de Colpitas. Los litologías principales pueden ser consideradas diferentes unidades hidroestratigráficas (Tabla 5-8). Juntas, estas unidades controlan el flujo de agua subterránea en los depósitos no consolidados. Pero, hay que recordar que no hay muchos datos disponibles sobre las características

hidrogeológicas de la cuenca, y por eso, la información en Tabla 5-8 debe ser considerada preliminar.

Tabla 5-8: Unidades Hidroestratigráficas (Depósitos No Consolidados) de la Cuenca Colpitas.

Categoría Geológica	Unidad Hidroestratigráfica	Tipo Probable de Acuífero	Importancia Hidrogeológica
Aluvial / Fluvial / Piedemonte (Grueso)	Sedimentos Gruesos	Libre a semi-confinado	Alta
Fluvioglaciales			
Aluvial / Fluvial / Piedemonte (Fino)	Sedimentos Finos	Libre a semi-confinado	Media
Glacilacustres			Baja
Lacustre			Baja
Coluvial	Tamaños de grano mixtos	Libre	Baja a media
Morrénicos			
Eólicas	Eólicos	Libre a semi-confinado	Media a alta
Bofedales / Palustres / Borateras	Bofedales / Palustres / Borateras	Libre	Baja a alta

5.3.5 Características de Flujo del Agua Subterránea

En esta sección se ofrece información disponible relacionada a los sistemas de flujo del agua subterránea, elevaciones de las aguas subterráneas y direcciones de flujo, y mecanismos de recarga y descarga. Desafortunadamente, AMEC no encontró muchos datos con respecto a estos temas. El mapa hidrogeológico de Chile (DGA, 1986) muestra las unidades hidrogeológicas generales de la cuenca, pero no tiene información sobre secciones transversales, perfiles subsuperficiales, información de pozos, esquemáticos geológicos, direcciones de flujo, ni caudales de agua subterránea. AMEC no encontró información sobre perforaciones, piezómetros, pozos, pruebas hidráulicas, ni parámetros hidráulicas. El alcance del presente estudio no permitió la colección de estos tipos de datos. Por lo tanto, es difícil caracterizar el flujo de agua subterránea en detalle.

Se sabe poco sobre las interacciones entre las unidades del lecho rocoso, ni entre el lecho rocoso y acuíferos superficiales. En la Cuenca de Colpitas, se puede encontrar quebradas, arroyos, ríos, manantiales, áreas dominadas por borateras (salares de Boro), y bofedales (no hay lagos permanentes en la cuenca). Las borateras (depósitos

evaporíticos) fueron creadas por un proceso endorreico. Sin embargo, no hay mucha información con respecto a interacciones potenciales entre los sistemas de agua subterránea y los de agua superficial.

5.3.6 Los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea

El flujo de agua subterránea en el sistema hidrogeológico de Colpitas se produce a varias escalas. Los sistemas locales muestran los caminos más cortos de flujo, tiempos de residencia relativamente breves y rápidas respuestas a los cambios hidrológicos del nivel del agua, la recarga de las precipitaciones y manantiales, y la descarga hacia formaciones consolidadas subyacentes (sistemas intermedios y regionales de flujo) y las quebradas. Estos sistemas de flujo se encuentran típicamente en los acuíferos no consolidados. Aunque los valores de conductividad hidráulica de estos acuíferos son variables, los sedimentos superficiales probablemente son más permeables que las formaciones consolidadas subyacentes. El flujo dentro de los sistemas superficiales es debido a la porosidad primaria, y generalmente no es dependiente de las estructuras secundarias del lecho rocoso.

Sistemas de aguas subterráneas intermedios o regionales de flujo también se encuentran en la Cuenca de Colpitas. El flujo de agua subterránea en estos sistemas depende de las características litológicas y estructuras geológicas tales como las capas volcánicas, pliegues, y otros. Los caudales son más lentos que en los acuíferos no consolidados debido a la baja porosidad primaria y la baja conductividad hidráulica. Los tiempos de residencia probablemente varían de años a décadas (los sistemas regionales) y de décadas a siglos (los sistemas regionales). Los datos existentes hasta la fecha no son suficientes para permitir evaluaciones detalladas de los sistemas de flujo local, intermedio, ni regional.

5.3.7 Niveles de Agua Subterránea y Direcciones de Flujo

Desafortunadamente no se encuentran ningún tipo de datos de los niveles de agua subterránea en la Cuenca Colpitas. Entonces, los hidrogramas no están disponibles para revisar. Se cree que, en general, los niveles de agua subterránea son bajos durante la estación seca debido al descenso de la precipitación y el aumento de la evapotranspiración. Durante la estación húmeda, el aumento de la humedad y la precipitación crean mayores tasas de recarga del acuífero. Aunque las direcciones de flujo de agua subterránea no son muy bien conocidas, en general el agua subterránea probablemente sigue la topografía de la cuenca.

5.3.7.1. Mecanismos de Recarga y Descarga

AMEC no encontró ningún estudio hidrogeológico sobre la Cuenca Colpitas. Por eso, se sabe poco con respecto a la recarga y la descarga del agua subterránea. Sin embargo, probablemente la recarga de aguas subterráneas se deriva de las

precipitaciones, la escorrentía superficial, y las quebradas locales. Los flujos locales de recarga, de agua superficial y de agua subterránea, fluyen desde las zonas topográficamente más altas, hacia las zonas de descarga; las cuales se encuentran en las partes menos elevadas de la cuenca.

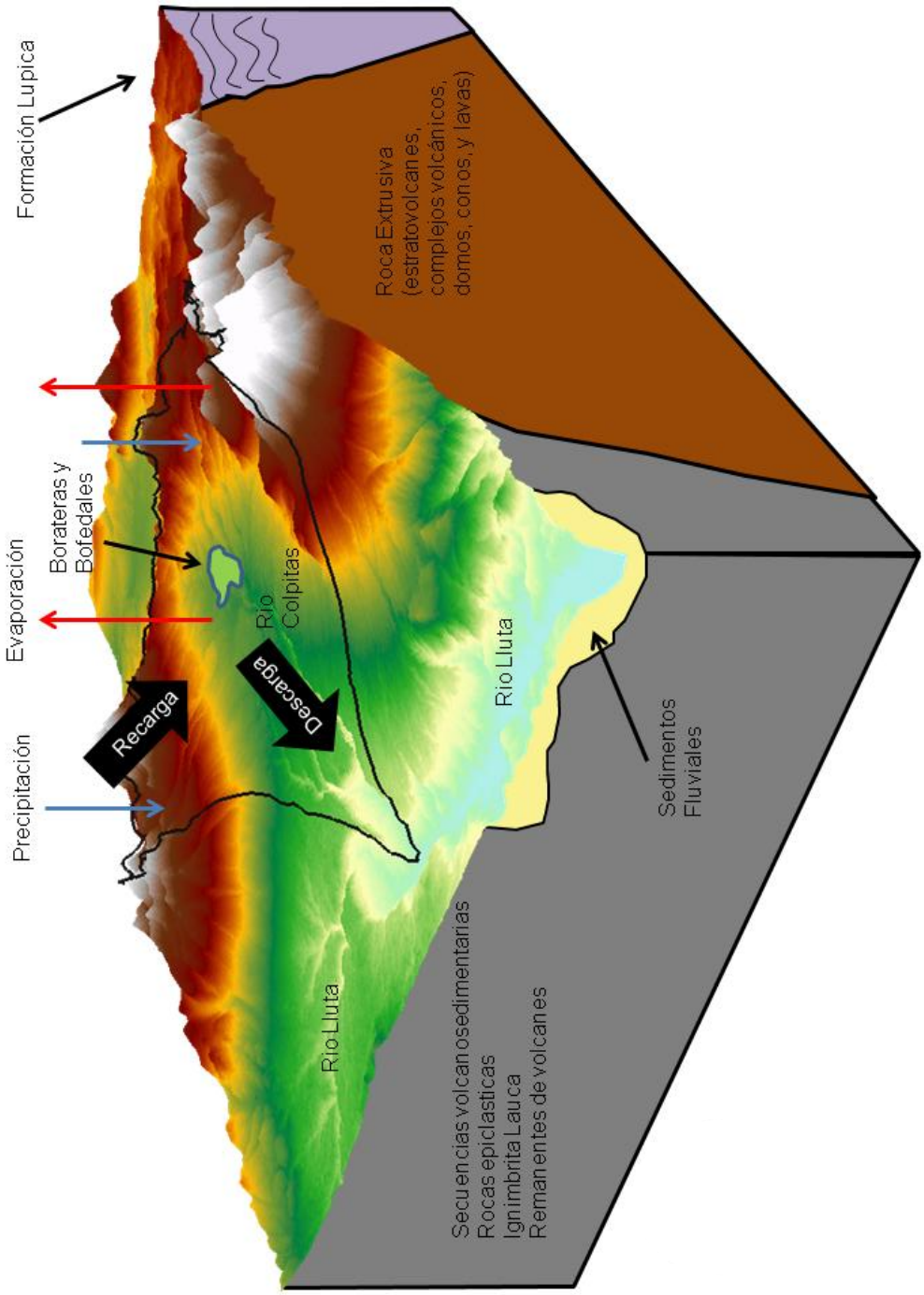
Se espera que el flujo de las aguas subterráneas coincida con la línea divisoria de las aguas superficiales dentro de las sub-cuencas. Es probable que las áreas claves para la recarga incluyen las zonas elevadas, y que las principales zonas de descarga son las quebradas, bofedales, manantiales, y posiblemente las borateras. La relación entre recarga y descarga con respecto a las aguas subterráneas y las quebradas, bofedales, y borateras no es bien conocida. Es posible que la relación pueda cambiar estacionalmente.

En general, la recarga del acuífero es baja durante la estación seca debido al descenso de las precipitaciones y el incremento de la evapotranspiración. Durante la estación húmeda, la humedad y la precipitación se incrementan considerablemente aumentando la recarga del acuífero. AMEC no encontré información sobre la cantidad de lluvia, nieve, ni evapotranspiración potencial.

5.3.8 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Un modelo conceptual hidrogeológico es una descripción cualitativa y simplificada de los componentes del sistema hidrogeológico para un área dada. Este modelo define los acuíferos y unidades hidroestratigráficas, describe la ocurrencia y movimiento de las aguas subterráneas, e identifica las interacciones entre los acuíferos y aguas superficiales. Uno de los propósitos principales para la construcción de un modelo conceptual es organizar los datos disponibles para permitir un análisis cuantitativo completo y exacto del sistema. Los modelos conceptuales son típicamente ilustrados con diagramas de bloques. Como se mencionó anteriormente, la geología de la región de la Cuenca Colpitas se caracteriza por varias unidades de lecho rocoso sobrepuesto en algunas áreas por sedimentos superficiales no consolidados que, en algunos casos, forman acuíferos. Las unidades hidroestratigráficas corresponden en general con estos tipos litológicos. La Figura 5-16 es un diagrama de bloque hidrogeológico conceptual que muestra una porción de la zona de la Cuenca Colpitas.

Figura 5-16: Modelo Hidrogeológico Conceptual de Bloque.



Fuente: Elaboración propia.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

6.0 SOLUCIONES ALTERNATIVAS

6.1 Criterios para la Identificación de Alternativas

La identificación de alternativas requiere en primer lugar la definición de un objetivo para el mejoramiento de la calidad de aguas del Colpitas, En tal sentido se entiende que el uso preferente del esta agua debe ser en actividades agrícolas intensivas que permitan elevar el nivel de productividad física y económica del Valle del Lluta, Considerando este objetivo general es posible establecer los siguientes criterios para la identificación de alternativas:

- La tecnología debe ser compatible con prácticas de cultivo intensivo, permitiendo una optimización del uso del agua, con costos razonables y requerimientos de servicios de fácil acceso,

- La sustentabilidad de las alternativas debe ser tal que ellas sean ambientalmente amigables, sin causar daños ambientales mayores y facilitando prácticas de tecnologías limpias,

- Tanto su capacidad como su manejo operacional deben ser robustos, lo que obliga a definir alternativas basadas en experiencias comercialmente válidas, no resulta aceptable promover el uso de tecnologías que requieran largos procesos de desarrollo,

- En lo posible que sean alternativas de desarrollo progresivo, ampliables, de tipo modular, lo que estaría sintonizado con un cambio de producción agrícola que necesariamente se dará en un cierto horizonte de tiempo, Se estima que estos cambios toman 5 a 10 años,

- La tecnología debe permitir generar agua con calidad suficiente para nuevos cultivos, con bajo contenido de Boro, Arsénico y otros elementos químicos perjudiciales a muchas especies vegetales, Eventualmente esta agua puede ser de calidad potable,

- Atendiendo al hecho de que cualquier alternativa incluirá tecnologías activas, que son aquellas que requieren atención operacional permanente), se preferirá las que incluyan menos componentes, de más fácil mantención y en lo posible que sean unidades autónomas,

- Existen otros criterios de selección que deben considerarse, entre ellos que las instalaciones sean seguras, no incluyan elementos riesgosos, que su diseño sea compacto y en lo posible con una instalación en un solo nivel,

- En general se consideran alternativas que tienen un beneficio central, que responde al aumento de un bien esencial para la producción agrícola de lato rendimiento, como es el agua de calidad adecuada a los cultivos que esta estrategia proponga,

- Es un hecho importante que la tecnología requiere de aceptación social, lo que puede lograrse a través de un dialogo con los interesados, Esta fase no está incluida en el análisis pero se estima relevante de realizar previo a cualquier inversión,

- Se considera que el análisis de alternativas debe incluir aspectos tales como: tamaño de la solución, localización, tecnología y los criterios antes expuestos, lo que está de acuerdo con las directrices 2013 del Ministerio de Desarrollo Social.

6.2 Desarrollo de Alternativas

Para el desarrollo de las alternativas se ha considerado que las aguas que pueden ser captadas o tratadas corresponden a la Cuenca del Lluta, independiente que sean de Valle del Colpitas, considerando que el objetivo es la disminución del contenido de Boro de las aguas de regadío actualmente en uso en el valle agrícola del río Lluta, y no necesariamente focalizar el esfuerzo en el río Colpitas.

Las alternativas recogen los criterios antes enunciados, y en general no son totalmente excluyentes, pero tienen un planteamiento diferenciado. A continuación se describen las alternativas identificadas.

Es relevante destacar que el planteamiento de las soluciones alternativas propuestas se limita al desarrollo de ingeniería nivel de perfil y, por tanto, no consideró la realización de estudios técnicos de ingeniería, estudio de impactos ambientales potenciales, estudio legal sobre propiedad de la tierra, evaluación económica ni ningún otro tipo de estudio específico que evaluara y avalara su factibilidad. La decisión de ejecutar alguna de las alternativas propuestas a nivel de perfil, u otra solución alternativa que se estime apropiada, debería considerar el análisis en profundidad de los aspectos antes mencionados.

Las tecnologías disponibles para tratar Boro son las mismas que se usan para otros metaloides, entre ellos el Arsénico, con variaciones en eficiencias y estructura de planta dependiendo de las concentraciones de elementos, variedad de compuestos químicos existentes, y propiedades físico químicas presentes en el agua a tratar. Para efectos de comporación de estas tecnologías se presenta la Tabla 6-1 a continuación, donde se ha destacado el proceso, la tecnología, sus costos y eficiencias.

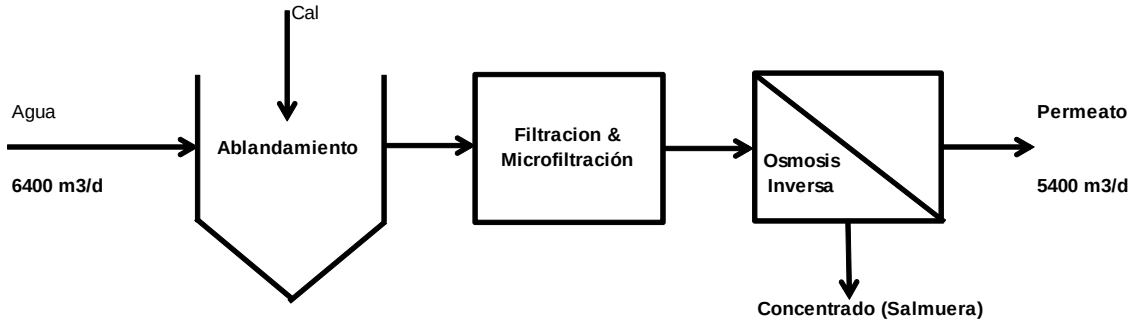
Tabla 6-1: Comparación de tecnooogías de tratamiento de aguas

Proceso	Tecnología	Costo Planta US$/m^3	Eficiencia %	Nivel desarrollo	Observación
Físico	Osmosis Inversa	1,0	60	Comercial	Con pH> 10, remoción= 90%; principal tratamiento para B
	Adsorción	1,0	20	Comercial	Complemento a la Osmosis Inversa
Fisico Químico	Intercambio Iónico	0,6	90	I&D	Resinas específicas (i.e. Amberlite) y pH< 8
	Precipitación	1,2	40	Comercial	Baja eficiencia
	Electrodialisis	1,7	60	I&D	Alto consumo de energía
Biológico	Remoción por Plantas	0,6	15	I&D	No hay información comercial

En general se considera que la tecnología de osmosis inversa es la más usada comercialmente, motivo por el cual se ha tomado como referencia de la evaluación y el desarrollo de soluciones. No obstante esto, las otras tecnologías resultan viables de utilizar pese a que algunas requieren investigación y desarrollo tecnológico.

Una planta de tratamiento tiene una estructura que combina distintos procesos de tratamiento dependiendo de la calidad de agua a ser tratada y del objetivo perseguido. Atendiendo a la alta concentración de Boro de las aguas que deberían ser tratadas se estima que la planta debería incorporar una estructura de tratamiento secuencial, tal como se puede observar en el diagrama siguiente:

Figura 6-1: Estructura de una plata de tratamiento tipo



Fuente: Adapatado de Rahman (2009).

6.2.1 Alternativa 1

Se plantea la instalación de una planta de tratamiento en la parte baja de la Cuenca del Lluta, ubicada en la parte alta del valle agrícola del río Lluta (aprox. 50 km desde la desembocadura). Su ventaja principal es su localización, ya que la planta se encuentra cerca de los puntos de consumo, y no requiere conducción de larga distancia. La dimensión de la planta queda sujeta a una planificación de crecimiento del uso de aguas de regadío de mejor calidad. La base de cálculo considerada se presenta en la Tabla 6-2.

La planta de tratamiento puede ser modular, lo que permite un crecimiento de acuerdo a esta demanda, sin necesidad de tener capacidad ociosa, La planta requiere una captación de aguas en el río Lluta y una red de distribución de las aguas hacia los productores agrícolas. Como todas las soluciones propuestas requieren de esta red, no se ha incorporado su evaluación en la comparación de alternativas.

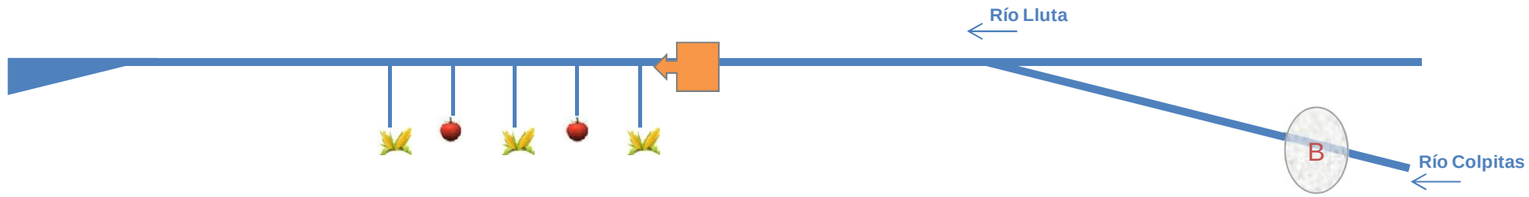
Tabla 6-2: Base de cálculo para Alternativa 1.

Ítem	Valor	Unidad
Superficie de riego	100	ha
Agua requerida	1.400.000	m3/año
Agua requerida	54	L/s
Inversión planta de tratamiento	3,82	Millones de US$
Costo unitario operación anual	0,50	US$/m3

Fuente: Elaboración propia

La Figura 6-2 sintetiza las características principales de la alternativa y presenta su evaluación económica.

Esquema conceptual:



Descripción:

Se plantea la instalación de una planta de tratamiento en la parte baja de la cuenca del Lluta, ubicada en la parte alta del valle agrícola del río Lluta (aprox. 50 km desde la desembocadura). La ventaja principal es su localización, ya que la planta se encuentra cerca de los puntos de consumo, y no requiere conducción de larga distancia. La dimensión de la planta queda sujeta a una planificación de crecimiento del uso de aguas de regadío de mejor calidad.

Evaluación económica del proyecto:

FLUJO DE CAJA ALTERNATIVA 1		Años										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	**US$/año**		**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**10.523.359**
	Venta		9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000
	Valor Residual planta											763.359
Egresos	**US$/año**	**3.816.793**	**1.779.235**	**1.779.235**	**1.779.235**	**1.779.235**	**1.779.235**	**1.779.235**	**1.779.235**	**1.779.235**	**1.779.235**	**1.779.235**
Inversión	**US$**	**3.816.793**										
Costo agua bruta	US$/año		280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000
Costo operación planta agua	US$/año		696.199	696.199	696.199	696.199	696.199	696.199	696.199	696.199	696.199	696.199
Semillas	US$/año		5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200
Fertilización	US$/año		45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000
Herbicidas	US$/año		9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200
Insumos varios	US$/año		236	236	236	236	236	236	236	236	236	236
Energía electrica riego	US$/año		23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400
Mano de obra cosecha	US$/año		720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000
Total Margen Bruto	**US$/año**	**-3.816.793**	**7.980.765**	**7.980.765**	**7.980.765**	**7.980.765**	**7.980.765**	**7.980.765**	**7.980.765**	**7.980.765**	**7.980.765**	8.744.124
Depreciación	US$/año		381.679	381.679	381.679	381.679	381.679	381.679	381.679	381.679	381.679	381.679
Margen Neto	US$/año		7.599.086	7.599.086	7.599.086	7.599.086	7.599.086	7.599.086	7.599.086	7.599.086	7.599.086	8.362.444
Impuestos (20%)	US$/año		1.519.817	1.519.817	1.519.817	1.519.817	1.519.817	1.519.817	1.519.817	1.519.817	1.519.817	1.672.489
Utilidad	US$/año		6.079.269	6.079.269	6.079.269	6.079.269	6.079.269	6.079.269	6.079.269	6.079.269	6.079.269	6.689.955
Flujo de caja	US$/año	-3.816.793	6.460.948	6.460.948	6.460.948	6.460.948	6.460.948	6.460.948	6.460.948	6.460.948	6.460.948	7.071.635
Flujo de caja actualizado (12%)	US$/año	-3.816.793	5.768.703	5.150.628	4.598.775	4.106.049	3.666.115	3.273.317	2.922.605	2.609.468	2.329.883	2.276.877
Indicadores de Rentabilidad												
VAN total (US$)		**32.885.629**										
TIR (%)		**170**										

Leyenda

- Río - cauce natural
- Canal de riego
- Conducción mediante piping
- Conducción menor mediante piping
- Bloqueo cauce
- Boratera
- Planta de tratamiento
- Cultivo tolerante alta concentración de B
- Cultivo con requerimiento de baja concentración de B

TÍTULO:

Evaluación Económica Alternativa 1

PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

CLIENTE: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	6-2

6.2.2 Alternativa 2

Se plantea una planta de tratamiento en la parte alta de la cuenca del Colpitas, que se localiza aguas abajo de las borateras, lo que permite tratar aguas con alto contenido de Boro, que corresponden exclusivamente al río Colpitas (Figura 6-3).

Se propone la instalación de una planta de tratamiento en la parte alta de la cuenca del Colpitas, que se localiza aguas abajo de las borateras, lo que permite tratar aguas con alto contenido de Boro, que corresponden exclusivamente al río Colpitas. La ventaja principal de esta alternativa es la eficiencia operativa de la planta, ya que se tratará una corriente muy concentrada pero de menor volumen que la Alternativa 1. La desventaja es la necesidad de incluir una conducción desde el valle de Colpitas hasta la cabecera de la zona agrícola del Lluta (aproximadamente 50 km). La planta de tratamiento puede ser modular, lo que permite un crecimiento de acuerdo a la demanda, sin necesidad de tener capacidad ociosa, sin embargo la conducción debe ser dimensionada para capacidad máxima. La planta requiere una captación de aguas en el río Colpitas. La base de cálculo considerada se presenta en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3: Base de cálculo para Alternativa 2.

Ítem	Valor	Unidad
Superficie de riego	100	ha
Material de tubería	Acero	Golpe de ariete estimado superior a 100 mca
Velocidad máx.	2	m/s
Velocidad diseño	1,5	m/s
Área conducción	0,036	m2
	360	cm2
Diámetro tubería	10,7	cm
Diámetro diseño	11,8	cm
	5	pulg
Longitud medida	60	km
Longitud diseño	78	km
Costo unitario tubería	70	US$/m
Costo unitario transporte	4000	US$/250m
Costo tubería	5.460.000	US$
Costo transporte	1.248.000	US$
Costo adicional	1.365.000	US$
Costo total conducción	8.073.000	US$
Superficie de riego	100	ha
Caudal de diseño	1.400.000	m3/año
Caudal de diseño	54	l/s
Inversión planta de tratamiento	3,82	Millones de US$
Costo unitario operación anual Trat+Cond	0,60	US$/m3

Fuente: Elaboración propia

Esquema conceptual:

Descripción:
Se propone la instalación de una planta de tratamiento en la parte alta de la cuenca del Colpitas, que se localiza aguas abajo de las borateras, lo que permite tratar aguas con alto contenido de Boro, que corresponden exclusivamente al río Colpitas. La ventaja principal de esta alternativa es la eficiencia opertaiva de la planta, ya que se tratará una corriente muy concentrada pero de menor volumen que la Alternativa 1. La desventaja es la necesidad de incluir una conducción desde el valle de Colpitas hasta la cabecera de la zona agrícola del Lluta (aproximandamente 50 km). La planta de tratamiento puede ser modular, lo que permite un crecimiento de acuerdo a la demanda, sin necesidad de tener capacidad ociosa, sin embargo la conducción debe ser dimensionada para capacidad máxima. La planta requiere una captación de aguas en el río Colpitas.

Evaluación económica del proyecto:

FLUJO DE CAJA ALTERNATIVA 2		Años										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	**US$/año**		**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**10.523.359**
	Venta		9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000
	Valor Residual planta											763.359
Egresos	**US$/año**	**11.889.793**	**1.919.235**	**1.919.235**	**1.919.235**	**1.919.235**	**1.919.235**	**1.919.235**	**1.919.235**	**1.919.235**	**1.919.235**	**1.919.235**
Inversión	**US$**	**11.889.793**										
Costo agua bruta	US$/año		280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000
Costo operación planta agua	US$/año		836.199	836.199	836.199	836.199	836.199	836.199	836.199	836.199	836.199	836.199
Semillas	US$/año		5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200
Fertilización	US$/año		45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000
Herbicidas	US$/año		9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200
Insumos varios	US$/año		236	236	236	236	236	236	236	236	236	236
Energía electrica riego	US$/año		23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400
Mano de obra cosecha	US$/año		720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000
Total Margen Bruto	**US$/año**	**-11.889.793**	**7.840.765**	**7.840.765**	**7.840.765**	**7.840.765**	**7.840.765**	**7.840.765**	**7.840.765**	**7.840.765**	**7.840.765**	**8.604.124**
Depreciación	US$/año		1.188.979	1.188.979	1.188.979	1.188.979	1.188.979	1.188.979	1.188.979	1.188.979	1.188.979	1.188.979
Margen Neto	US$/año		6.651.786	6.651.786	6.651.786	6.651.786	6.651.786	6.651.786	6.651.786	6.651.786	6.651.786	7.415.144
Impuestos (20%)	US$/año		1.330.357	1.330.357	1.330.357	1.330.357	1.330.357	1.330.357	1.330.357	1.330.357	1.330.357	1.483.029
Utilidad	US$/año		5.321.429	5.321.429	5.321.429	5.321.429	5.321.429	5.321.429	5.321.429	5.321.429	5.321.429	5.932.115
Flujo de caja	US$/año	-11.889.793	6.510.408	6.510.408	6.510.408	6.510.408	6.510.408	6.510.408	6.510.408	6.510.408	6.510.408	7.121.095
Flujo de caja actualizado (12%)	**US$/año**	**-11.889.793**	**5.812.864**	**5.190.057**	**4.633.980**	**4.137.482**	**3.694.180**	**3.298.375**	**2.944.978**	**2.629.445**	**2.347.718**	**2.292.802**
Indicadores de Rentabilidad												
VAN total (US$)		**25.092.089**										
TIR (%)		**54**										

Leyenda

- Río - cauce natural
- Canal de riego
- Conducción mediante piping
- Conducción menor mediante piping
- Bloqueo cauce
- B — Boratera
- Planta de tratamiento
- Cultivo tolerante alta concentración de B
- Cultivo con requerimiento de baja concentración de B

TÍTULO:
Evaluación Económica Alternativa 2

PROYECTO:
ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

CLIENTE: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	6-3

6.2.3 Alternativa 3

Esta alternativa considera plantas de osmosis inversa instaladas en los predios agrícolas según sea la demanda real de agua de mejor calidad, según el tipo de cultivos realizado. Cada planta sería de tamaño estándar, lo que genera facilidades de mantención en base a una misma tecnología.

Esta solución no requiere nuevas captaciones que las existentes, ya que el agua sería captada en la red de riego actualmente en uso.

Presenta ventajas por ser infraestructura menor, adaptable a las necesidades locales, no afecta a población ni territorios indígenas y es coherente con las capacidades económicas locales. La base de cálculo considerada se presenta en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4: Base de cálculo para Alternativa 3

Ítem	Valor	Unidad
Superficie de riego	1	ha
Agua requerida	14.000	m3/año
	1	l/s
Inversión Planta de Tratamiento	0,06	Millones de US$
Costo Unitario Operación Anual	0,83	US$/m3
Costo Planta	20.000.000	$
Costo Comercial	30.000.000	$

Fuente: Elaboración propia

La Figura 6-4 sintetiza las características principales de la alternativa y presenta su evaluación económica.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Esquema conceptual:

Descripción:
Esta alternativa considera plantas de osmosis inversa que se instalarían en los predios agrícolas según sea la demanda real de agua de mejor calidad, Cada planta sería de tamaño estándar, lo que genera facilidades de mantención en base a una misma tecnología.
Esta solución no requiere nuevas captaciones que las existentes, ya que el agua sería captada en la red de riego actualmente en uso.
Presenta ventajas por ser infraestructura menor, adaptable a las necesidades locales, no afecta a población indígena y es coherente con las capacidades económicas locales.

Evaluación económica del proyecto:

FLUJO DE CAJA ALTERNATIVA 3		Años										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	**US$/año**		**97.600**	**97.600**	**97.600**	**97.600**	**97.600**	**97.600**	**97.600**	**97.600**	**97.600**	**109.600**
	Venta		97.600	97.600	97.600	97.600	97.600	97.600	97.600	97.600	97.600	97.600
	Valor Residual planta											12.000
Egresos	**US$/año**	**60.000**	**17.291**	**17.291**	**17.291**	**17.291**	**17.291**	**17.291**	**17.291**	**17.291**	**17.291**	**17.291**
Inversión	US$	60.000										
Costo agua bruta	US$/año		2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
Costo operación planta agua	US$/año		11.661	11.661	11.661	11.661	11.661	11.661	11.661	11.661	11.661	11.661
Semillas	US$/año		52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
Fertilización	US$/año		450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Herbicidas	US$/año		92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
Insumos varios	US$/año		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Energía electrica riego	US$/año		234	234	234	234	234	234	234	234	234	234
Mano de obra cosecha	US$/año		2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Total Margen Bruto	**US$/año**	**-60.000**	**80.309**	**80.309**	**80.309**	**80.309**	**80.309**	**80.309**	**80.309**	**80.309**	**80.309**	**92.309**
Depreciación	US$/año		6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Margen Neto	US$/año		74.309	74.309	74.309	74.309	74.309	74.309	74.309	74.309	74.309	86.309
Impuestos (20%)	**US$/año**		**14.862**	**14.862**	**14.862**	**14.862**	**14.862**	**14.862**	**14.862**	**14.862**	**14.862**	**17.262**
Utilidad	US$/año		59.447	59.447	59.447	59.447	59.447	59.447	59.447	59.447	59.447	69.047
Flujo de caja	US$/año	-60.000	65.447	65.447	65.447	65.447	65.447	65.447	65.447	65.447	65.447	75.047
Flujo de caja actualizado (12%)		-60.000	58.435	52.174	46.584	41.593	37.136	33.157	29.605	26.433	23.601	24.163
Indicadores de Rentabilidad												
VAN total (US$)		**312.881**										
VAN 100 ha (US$)		**31.288.089**										
TIR (%)		**109**										

Leyenda

- Río - cauce natural
- Canal de riego
- Conducción mediante piping
- Bloqueo de cauce
- B — Boratera
- Planta de tratamiento
- Cultivo tolerante alta concentración de B
- Cultivo con requerimiento de baja concentración de B

TÍTULO:
Evaluación Económica Alternativa 3

PROYECTO:
ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

CLIENTE: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°: E90008

ESCALA: Sin Escala

FIGURA: 6-4

6.2.4 Alternativa 4

Esta alternativa considera desviar las aguas de baja concentración de elementos químicos antes de las borateras, y conducirlas hacia la parte baja del Valle del Lluta. No requiere la instalación de planta de tratamiento.

Esta solución requiere acuerdo con la población indígena, y un uso de su territorio para construir la captación y conducción. Presenta ciertos problemas técnicos ya que el agua deberá bajar gravitacionalmente desde una alta cota, cercana a 5.000 m.s.n.m., para llegar a una cota inferior del orden de 1.000 m.s.n.m. La base de cálculo considerada se presenta en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5: Base de cálculo para Alternativa 4.

Ítem	Valor	Unidad
Superficie de riego	100	ha
Agua requerida	1400000	m3/año
Agua requerida	54	l/s
Inversión tratamiento	0	Millones de US$
Costo unitario operación anual conducción	0,100	US$/m3
Tubería	Acero	Golpe de ariete superior a 100 mca
Velocidad máx.	2,0	m/s
Velocidad diseño	1,5	m/s
Área conducción	0	m2
	360,1	cm2
Diámetro tubería	10,7	cm
Diámetro diseño	11,8	cm
	5	pulgada
Longitud medida	86	km
Longitud diseño	112	km
Costo unitario	70	US$/m
Costo unitario transporte	4.000	US$/250m
Costo tubería	7826000	US$
Costo transporte	1.788.800	US$
Costo adicional	1.956.500	US$
Costo total	11.571.300	US$

Fuente: Elaboración propia

La Figura 6-5 sintetiza las características principales de la alternativa y presenta su evaluación económica.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Esquema conceptual:

Descripción:

Esta alternativa considera desviar las aguas de baja concentración de elementos químicos antes de las borateras, y conducirlas hacia la parte baja del Valle del Lluta. No requiere la instalación de planta de tratamiento.

Esta solución requiere acuerdo con la población indígena, y un uso de su territorio para construir la captación y conducción. Presenta ciertos problemas técnicos ya que el agua deberá bajar gravitacionalmente desde una alta cota, cercana a 5.000 m.s.n.m, para llegar a una cota inferior del orden de 1.000 m.s.n.m.

Evaluación económica del proyecto:

FLUJO DE CAJA ALTERNATIVA 4		Años										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	**US$/año**		**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**	**9.760.000**
	Venta		9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000	9.760.000
	Valor Residual planta											0
Egresos	**US$/año**	**11.571.300**	**1.223.036**	**1.223.036**	**1.223.036**	**1.223.036**	**1.223.036**	**1.223.036**	**1.223.036**	**1.223.036**	**1.223.036**	**1.223.036**
Inversión	**US$**	**11.571.300**										
Costo agua bruta	US$/año		280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000	280.000
Costo operación planta agua	US$/año		140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000
Semillas	US$/año		5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200	5.200
Fertilización	US$/año		45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000	45.000
Herbicidas	US$/año		9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200	9.200
Insumos varios	US$/año		236	236	236	236	236	236	236	236	236	236
Energía electrica riego	US$/año		23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400	23.400
Mano de obra cosecha	US$/año		720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000	720.000
Total Margen Bruto	**US$/año**	**-11.571.300**	**8.536.964**	**8.536.964**	**8.536.964**	**8.536.964**	**8.536.964**	**8.536.964**	**8.536.964**	**8.536.964**	**8.536.964**	**8.536.964**
Depreciación	US$/año		1.157.130	1.157.130	1.157.130	1.157.130	1.157.130	1.157.130	1.157.130	1.157.130	1.157.130	1.157.130
Margen Neto	US$/año		7.379.834	7.379.834	7.379.834	7.379.834	7.379.834	7.379.834	7.379.834	7.379.834	7.379.834	7.379.834
Impuestos (20%)	US$/año		1.475.967	1.475.967	1.475.967	1.475.967	1.475.967	1.475.967	1.475.967	1.475.967	1.475.967	1.475.967
Utilidad	US$/año		5.903.867	5.903.867	5.903.867	5.903.867	5.903.867	5.903.867	5.903.867	5.903.867	5.903.867	5.903.867
Flujo de caja	US$/año	-11.571.300	7.060.997	7.060.997	7.060.997	7.060.997	7.060.997	7.060.997	7.060.997	7.060.997	7.060.997	7.060.997
Flujo de caja actualizado (12%)	US$/año	-11.571.300	6.304.462	5.628.984	5.025.878	4.487.391	4.006.599	3.577.321	3.194.037	2.851.818	2.546.266	2.273.452
Indicadores de Rentabilidad												
VAN total (US$)		**28.324.909**										
TIR (%)		**61**										

Leyenda

- Río - cauce natural
- Canal de riego
- Conducción mediante piping
- Bloqueo de cauce
- B — Boratera
- Planta de tratamiento
- Cultivo tolerante alta concentración de B
- Cultivo con requerimiento de baja concentración de B

TÍTULO:

Evaluación Económica Alternativa 4

PROYECTO:

ESTUDIO CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COLPITAS, XV REGIÓN

PREPARADO POR: amec

CLIENTE: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

PROYECTO N°:	ESCALA:	FIGURA:
E90008	Sin Escala	6-5

Tabla 6-6: Comparación de alternativas según indicadores de rentabilidad

Alternativa	VAN (US$)	TIR (%)
1	32.885.629	170
2	25.092.089	54
3	31.288.089	109
4	28.324.909	61

Fuente: Elaboración propia

6.2.5 Aporte a la Comunidad Aymara de Colpitas

6.2.5.1. Situación Actual

Los estudios y monitoreos que se han informado en la Sección 4.1.1.2 muestran que la población Aymara de Colpitas capta aguas en distintos puntos, de los cuales se evaluaron nueve, para su consumo. Estos puntos han sido identificados por la comunidad a lo largo de su historia, diferenciando las así llamadas aguas buenas de las aguas malas, en base el sabor del agua, su salinidad y el efecto de ésta en el pelaje de los animales.

Los análisis de calidad de agua que se efectuaron permitieron llegar a las siguientes consideraciones:

- La captación de aguas se realiza en puntos que se definen en función de los requerimientos de la población según su sistema de vida. No son necesariamente fijos ya que dependen de estas necesidades y de la presencia del recurso, según condiciones climáticas y estacionales.

- El consumo por parte de la población está distribuido en el territorio, no corresponde sólo al poblado de Colpitas sino a distintos puntos, algunos bastante alejados y de difícil acceso. Por este motivo no se estima posible dar una solución que disponga del recurso en cada vivienda, sino debe asumir una solución parcial que permita suministro complementado con otras acciones locales.

- Estas aguas tienen efectivamente calidades superiores a otras, sin embargo se observan excedencias en varios parámetros contemplados en la NCH409/1 Of.2005 (INN, 2005) de agua potable, lo que es particularmente significativo en elementos metálicos, Arsénico y Calcio. Estos valores pueden considerarse excesivos para consumo humano de las aguas.

- El contenido de Boro es bajo respecto de otros cursos de agua de la subcuenca de Colpitas. Este elemento no está regulado en la NCH409/1 Of.2005 (INN,

2005), pero sí por la WHO (WHO, 1998) que establece como máximo un valor de 0,5 mg/L, límite que está por debajo de los valores medidos en cinco de los seis puntos. Debe considerarse que no hay antecedentes científicos que avalen efectos muy notables de valores como los que tiene estas aguas, de modo que no se estima como un tema crítico.

6.2.5.2. Restricciones a posibles soluciones

A partir de la situación actual que se ha esquematizado en la sección precedente, se entiende que una solución global e integral es de difícil implementación. En cualquier caso, la solución debe considerar ciertas restricciones, entre ellas las siguientes.

- Población muy pequeña para generar una solución económicamente viable, lo que no impide considerar su valor social y humano.

- Excesiva dispersión territorial del asentamiento humano, lo que limita el suministro basado en un solo punto de entrega del agua y define la necesidad de acción local para distribución del recurso.

- Calidad de agua relativamente buena respecto de otros puntos de captación, pero no suficiente para cumplir la norma de agua potable. La justificación de tratamiento debe verse en los efectos negativos de largo plazo en la salud humana al consumir aguas con elementos excedidos.

- La lejanía y aislamiento del lugar es un factor importante para definir soluciones que sean autónomas y de bajo requerimiento operacional y mantenimiento. .

- Tomando en cuenta una población de no más de 20 personas y un consumo humano diario de 100 litros por habitante, el consumo diario total sería del orden de 2 m^3/día.

6.2.5.3. Solución propuesta

Atendiendo a estas restricciones se propone una solución que no contempla sistema de tratamiento in situ dada la baja población existente. Para esta solución resulta factible un suministro periódico con camión aljibe. Con un consumo diario de 2 m^3/día, se estima que un camión con capacidad de 8 m^3, debería atender esta población con dos viajes semanales.

Esta solución requiere que se construya un sistema de almacenamiento de agua que estaría localizado en el poblado de Colpitas. A partir de este punto, los habitantes de la subcuenca deberían trasladarla por sus propios medios hacia sus puntos de consumo.

El sistema de almacenamiento incluiría un par de estanques, uno mayor de volumen de 20 m^3 y otro menor de 4 m^3. La razón de colocar dos estanques es que uno serviría de

reemplazo del otro cuando hubiese emergencias o tareas de limpieza y mantención. Los estanques podrían estar conectados a un sistema de cloración de agua, con el equipamiento correspondiente y la grifería necesaria para la entrega del recurso. La energía eléctrica sería suministrada por paneles solares, incluyendo iluminación y cercado del sitio de instalación. Complementariamente debe establecerse un monitoreo de la calidad de estas aguas.

6.3 Aspectos Legales Relativos a Comunidades, Territorio, y Recursos

A continuación se presentan los aspectos legales indígenas a tomar en consideración para la identificación de alternativas de solución en la resolución de la problemática presentada en el Río Colpitas. Las alternativas de solución corresponden a 4, de esas al menos dos implican una interacción directa con grupos humanos indígenas del sector de Colpitas o el uso de recursos naturales ocupados por éstos de manera ancestral. A continuación se presenta un marco conceptual, identificando las leyes y aspectos legales indígenas vigentes en Chile, y de manera posterior se hace un análisis por alternativa.

6.3.1 Marco conceptual

A continuación se presenta un análisis descriptivo de los aspectos legales indígenas identificados que pudiesen tener relación con el Proyecto.

6.3.2 Ley Indígena N°19.253

6.3.2.1. Aspectos generales

La ley 19.253 o ley indígena entró en vigencia el año 1993, y consigna en su artículo 1° que: "*es deber de la sociedad en general y del Estado en particular, a través de sus instituciones respetar, proteger y promover el desarrollo de los indígenas, sus culturas, familias y comunidades, adoptando las medidas adecuadas para tales fines y proteger las tierras indígenas, velar por su adecuada explotación, por su equilibrio ecológico y propender a su ampliación*".

Asimismo, estipula que: "*El Estado reconoce que los indígenas de Chile son los descendientes de las agrupaciones humanas que existen en el territorio nacional desde tiempos precolombinos, que conservan manifestaciones étnicas y culturales propias siendo para ellos la tierra el fundamento principal de su existencia y cultura. El Estado reconoce como principales etnias indígenas de Chile a: Mapuche, Aimara, Rapa Nui o Pascuenses, las comunidades Atacameñas, Quechuas, Collas y Diaguita del norte del país, las comunidades Kawashkar o Alacalufe y Yámana o Yagán de los canales australes*".

En este sentido, la ley establece normas orientadas a la protección, fomento y desarrollo de los pueblos indígenas y considera a las comunidades, asociaciones y personas naturales indígenas como sujetos de derecho, estableciendo un conjunto de instrumentos y mecanismos de reconocimiento, apoyados por otros cuerpos normativos (ley lafquenche y ley de monumentos nacionales).

Relacionando esta norma con lo dispuesto en la letra c) del artículo 11 de la ley 19.300, es importante resaltar que los indígenas son considerados como "*población protegida*" por leyes especiales por el reglamento del SEIA (artículo 8). Esta condición incluye los ámbitos culturales, sociales, económicos y territoriales de cada una de las poblaciones, grupos o comunidades humanas pertenecientes a los pueblos indígenas a que se refiere el artículo 1º de la ley 19.253 señalado en el párrafo anterior, independiente de su forma de organización.

Por otro lado, la ley 19.253 crea las Áreas de Desarrollo Indígena (ADI), al disponer en el párrafo 2° del Título III, artículo 26 que: "*El Ministerio de Planificación y Cooperación, a propuesta de la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena, podrá establecer áreas de desarrollo indígena, que serán espacios territoriales en que los organismos de la administración del Estado focalizarán su acción en beneficio del desarrollo armónico de los indígenas y sus comunidades*".

En concordancia con la creación de las ADI, y considerando el uso de los recursos naturales y patrimoniales por población protegida, el artículo 35 establece que: "*En la administración de las áreas silvestres protegidas, ubicadas en las áreas de desarrollo indígena, se considerará la participación de las comunidades ahí existentes. La Corporación Nacional Forestal o el Servicio Agrícola y Ganadero y la Corporación, de común acuerdo, determinarán en cada caso la forma y alcance de la participación sobre los derechos de uso que en aquellas áreas corresponda a las Comunidades Indígenas*". Estos aspectos son considerados en el Reglamento del SEIA, a través del artículo 17 (letra d10), cuando releva la pertinencia de considerar el uso y valorización de los recursos naturales y la apropiación del medio ambiente (uso medicinal, preparación de alimentos, entre otros).

Adicionalmente, la ley 19.253 protege las tierras y aguas indígenas de conformidad a los artículos 12 a 22, e incluso establece - de conformidad a su artículo 19 - el derecho a ejercer actividades en sitios sagrados y ceremoniales que sean de propiedad fiscal. En este sentido, reconoce la relevancia cultural del vínculo a la tierra, la construcción de memoria histórica, las relaciones con lazos parentales y la conformación de identidad indígena.

Por otro lado, la ley reconoce distintas formas de organización de los pueblos indígenas, comunidades y asociaciones. En efecto, de conformidad al artículo 9, entiende por comunidad indígena a: *"(…) toda agrupación de personas pertenecientes*

a una misma etnia indígena y que se encuentren en una o más de las siguientes situaciones:

- *Provengan de un mismo tronco familiar;*
- *Reconozcan una jefatura tradicional;*
- *Posean o hayan poseído tierras indígenas en común, y*
- *Provengan de un mismo poblado antiguo".*

Sin embargo, es importante considerar que existen otras organizaciones indígenas reconocidas por la ley como el Consejo de Ancianos del Pueblo Rapa Nui y los cacicados, en el caso de los Mapuche Huilliche, así como comunidades históricas, antropológicas o sociológicas desde el punto de vista conceptual, las cuales pueden no estar constituidas como comunidades en los términos a los cuales se refiere la ley 19.253, pero que es necesario identificar en el caso de intervenir algún sector que pudiese tener características indígenas especiales.

Con relación a la participación indígena, el artículo 34 señala que: *"Los servicios de la administración del Estado y las organizaciones de carácter territorial, cuando traten materias que tengan injerencia o relación con cuestiones indígenas, deberán escuchar y considerar la opinión de las organizaciones indígenas que reconoce esta ley. Sin perjuicio de lo anterior, en aquellas regiones y comunas de alta densidad de población indígena, éstos a través de sus organizaciones y cuando así lo permita la legislación vigente, deberán estar representados en las instancias de participación que se reconozca a otros grupos intermedios*". Este aspecto es reconocido por la normativa ambiental aplicable, en particular el RSEIA.

Respecto a las culturas indígenas, el párrafo 3° del Título I de la ley, estipula en su artículo 7, que "*El Estado reconoce el derecho de los indígenas a mantener y desarrollar sus propias manifestaciones culturales, en todo lo que no se oponga a la moral, a las buenas costumbres y al orden público*". Asimismo indica que, "*El Estado tiene el deber de promover las culturas indígenas, las que forman parte del patrimonio de la Nación chilena".*

Adicionalmente, y referido al patrimonio cultural de los pueblos indígenas, la ley desarrolla el Título IV (artículos 28 al 31), abordando el reconocimiento, respeto y protección de las culturas e idiomas indígenas. Lo anterior, a través de los esfuerzos de la CONADI y el Ministerio de Educación, la cooperación público-privada y el involucramiento de los gobiernos regionales y municipios en vistas a la promoción de planes y programas de fomento. Lo mismo ocurre con la protección del patrimonio histórico de las culturas indígenas, a través de apoyo del Archivo General de Asuntos

Indígenas, dependiente del Archivo Nacional de la Dirección de Bibliotecas, Archivos y Museos.

Por último, en el párrafo 5° del Título VIII se establecen "*Disposiciones Particulares para los Indígenas Urbanos y Migrantes*". Al respecto, el artículo 75 establece que: "*Se entenderá por indígenas urbanos aquellos chilenos que, reuniendo los requisitos del artículo 2 de esta ley*[5]*, se auto-identifiquen como indígenas y cuyo domicilio sea un área urbana del territorio nacional y por indígenas migrantes aquéllos que, reuniendo los mismos requisitos de origen precedentes, tengan domicilio permanente en una zona rural no comprendida en las definiciones de los artículos 60, 62, 66 y 72".*

Adicionalmente, el artículo 76 señala que: *"Los indígenas urbanos migrantes podrán formar Asociaciones Indígenas Urbanas o Migrantes, constituyéndolas de acuerdo a lo establecido en esta ley. La Asociación Indígena Urbana o Migrantes será una instancia de organización social, desarrollo cultural, apoyo y mutua protección y ayuda entre los indígenas urbanos o migrantes, respectivamente".*

6.3.2.2. Área de Desarrollo Indígena (ADI)

Como se señaló anteriormente, las Áreas de Desarrollo Indígena (ADI) son creadas por la ley 19.253 a través del actual Ministerio de Desarrollo Social. En este contexto, la normativa establece las condiciones para constituir un ADI, las competencias de los involucrados y las instancias para asumir el proceso de auto desarrollo o de desarrollo local, señalando que para su establecimiento deberán concurrir los siguientes criterios:

- *Espacios territoriales en que han vivido ancestralmente las etnias indígenas;*
- *Alta densidad de población indígena;*
- *Existencia de tierras de comunidades o individuos indígenas;*
- *Homogeneidad ecológica, y*
- *Dependencia de recursos naturales para el equilibrio de estos territorios, tales como manejo de cuencas, ríos, riberas, flora y fauna."*

La creación de las ADI se orientan al crecimiento de las comunidades en base a su propia identidad, reconociendo sus particularidades, demandas, formas de organización y concepto de territorio, velando por:

- *El acceso equitativo de mejores condiciones de vida;*

[5] *Hijos de padre o madre indígena, cualquiera sea la naturaleza de su filiación; descendientes de las etnias indígenas que habitan el territorio nacional, siempre que posean a lo menos un apellido indígena; los que mantengan rasgos culturales de alguna etnia indígena (artículo 2, ley 19.253)*

- *La superación de la pobreza, y,*

- *La solución a los problemas de tierras y aguas.*

En este sentido, las ADI se conciben como espacios de focalización de políticas coordinadas por el Estado - como lo indica la ley -, pero también contempla el concepto de protagonismo indígena, es decir una práctica orientada por el autodesarrollo o la autogestión de las comunidades en vistas al uso racional de los recursos naturales, humanos, económicos y culturales. En este marco, se busca que las economías indígenas pueden desarrollar sus potencialidades a través de flujos (productos agropecuarios, artesanales, fuerza de trabajo, entre otros), con los centros locales, provinciales o regionales.

Conforme lo anterior, la ley genera condiciones legales para que la gestión territorial en zonas en las que habita población indígena pueda ser realizada sustentándose en las formas particulares que tienen dichas culturas para relacionarse con su hábitat. En consecuencia, la dimensión territorial requiere considerar al menos dos ámbitos:

- Análisis de los propios indígenas acerca de su realidad particular, especialmente en los espacios rurales (origen de las culturas y de los pueblos indígenas, objeto de protección).

- Interacción cultural, donde los pueblos indígenas, sus sistemas de conocimiento, sus relaciones con el hábitat y sus prácticas constituyen un aporte para sociedades caracterizadas por procesos de modernización incompletos.

6.3.3 Ley 17.288 sobre Monumentos Nacionales

6.3.3.1. Aspectos generales

La ley 17.288 define un conjunto de conceptos e incorpora la temática indígena en su Título I, artículo 1° cuando define que son monumentos nacionales y quedan bajo la tuición y protección del Estado*: "los lugares, ruinas, construcciones u objetos de carácter histórico o artístico; los enterratorios o cementerios u otros restos de los aborígenes, las piezas u objetos antropo-arqueológicos, paleontológicos o de formación natural, que existan bajo o sobre la superficie del territorio nacional o en la plataforma submarina de sus aguas jurisdiccionales y cuya conservación interesa a la historia, al arte o a la ciencia; los santuarios de la naturaleza; los monumentos, estatuas, columnas, pirámides, fuentes, placas, coronas, inscripciones y, en general, los objetos que estén destinados a permanecer en un sitio público, con carácter conmemorativo. Su tuición y protección se ejercerá por medio del Consejo de Monumentos Nacionales, en la forma que determina la presente ley."*

Por su parte, los monumentos arqueológicos de propiedad del Estado son definidos por el artículo 21 como *"(…) los lugares, ruinas, yacimientos y piezas antropo-arqueológicas que existan sobre o bajo la superficie del territorio nacional*". Para efectos de la ley, se incluyen también las piezas paleontológicas y los lugares donde se hallaren.

Adicionalmente, el Consejo tiene atribuciones para declarar monumentos nacionales, elaborar proyectos o normas de restauración, reparación, conservación y señalización de los monumentos, conceder los permisos o autorizaciones para excavaciones de carácter histórico, arqueológico, antropológico o paleontológico en cualquier punto del territorio nacional, y hacer difusión cultural del patrimonio histórico, artístico y científico que le corresponde custodiar (artículos 6 y 7).

Por otro lado, el artículo 29 de la ley 17.288 y en lo que a temas ambientales e indígenas se refiere, señala: que *"para el efecto de mantener el carácter ambiental y propio de ciertas poblaciones o lugares donde existieren ruinas arqueológicas, o ruinas y edificios declarados Monumentos Históricos, el Consejo de Monumentos Nacionales podrá solicitar se declare de interés público la protección y conservación del aspecto típico y pintoresco de dichas poblaciones o lugares o de determinadas zonas de ellas",* requiriendo autorizaciones del Consejo de Monumentos Nacionales para hacer construcciones nuevas, ejecutar obras de reconstrucción o de mera conservación (artículo 30).

El artículo señalado en el párrafo anterior, se relaciona también con el artículo 29 de la ley indígena - orientado a proteger el patrimonio histórico de las culturas indígenas y los bienes culturales del país -, toda vez que se requerirá un informe previo a la Corporación de Desarrollo Indígena para:

- La venta, exportación o cualquier otra forma de enajenación al extranjero del patrimonio arqueológico, cultural o histórico de los indígenas de Chile.

- La salida del territorio nacional de piezas, documentos y objetos de valor histórico con el propósito de ser exhibidos en el extranjero.

- La excavación de cementerios históricos indígenas con fines científicos la que se ceñirá al procedimiento establecido en la ley N° 17.288 y su reglamento, previo consentimiento de la comunidad involucrada.

- La sustitución de topónimos indígenas.

Los aspectos mencionados son relevantes al momento de levantar línea base toda vez que exigen, en algunas ocasiones, información primaria ante la ausencia de bibliografía o antecedentes secundarios de respaldo.

6.3.4 Convenio 169 de la OIT sobre Pueblos Indígenas y Tribales en Países Independientes (C.169.OIT)

El Convenio 169 fue adoptado por la Conferencia Internacional del Trabajo en junio de 1969 y constituye un instrumento jurídico internacional con carácter vinculante que protege y regula los derechos de los pueblos indígenas en diferentes áreas de interés. Su implementación está en permanente evaluación por parte de la Comisión de Expertos en Aplicación de Convenios y Recomendaciones (CEACR). En este sentido, los trabajos e informes de la CEACR constituyen el eje sobre el que se articula el sistema de control de normas de la OIT.

El Convenio 169 recoge principios básicos asociados a:

- La auto-identificación de los pueblos indígenas y tribales, reconociendo que se trata de personas que comparten una unidad territorial, racial, cultural, lingüística y una historia común que se expresa en su quehacer cotidiano;
- La no discriminación (respeto de la cultura, religión, organización socioeconómica e identidad propia);
- La generación de medidas especiales ante la vulnerabilidad de los pueblos;
- La consulta y la participación;
- El derecho a decidir sus prioridades de desarrollo, las cuales deben ser conocidos y considerados al momento de aproximarse a las comunidades indígenas y emprender iniciativas que los involucre directa o indirectamente, o a sus tierras o aguas.

La premisa básica es que los pueblos indígenas son permanentes o perdurables. En este sentido, el Convenio 169 releva el derecho de los pueblos indígenas a ser reconocidos dentro de un Estado - con identidad propia y con derechos que se derivan de su presencia histórica y contemporánea -, y establece un sujeto de derecho colectivo y no sólo individual respecto de los pueblos indígenas. Conforme lo anterior, ningún Estado o grupo social tiene el derecho de negar la identidad que pueda afirmar un pueblo indígena y sus miembros.

En consecuencia, el Convenio 169 entrega recomendaciones para el reconocimiento de los derechos de los pueblos indígenas y demanda a los Estados adecuar las normativas nacionales para que cumpla a cabalidad los preceptos, principios y orientaciones que mandata cuando corresponda y de manera gradual. Asimismo, encarga a los gobiernos asumir la responsabilidad de desarrollar acciones y adoptar medidas especiales para proteger sus derechos, garantizar el respeto a su integridad,

salvaguardar las personas, las instituciones, los bienes, el trabajo, las culturas y el medio ambiente de los pueblos indígenas (artículo N° 4).

El Convenio 169 de la OIT está vigente en nuestro país desde el 15 de septiembre de 2009. En un sentido amplio, se puede indicar que los artículos del Convenio 169 relacionados con la evaluación ambiental de proyectos son los siguientes:

- Art 4. Medio ambiente (medidas especiales).
- Art 6. Participación Ciudadana.
- Art 7. Investigación Participativa en Estudios de Impacto Ambiental.
- Art. 8. Derecho Consuetudinario.
- Art. 13. Territorio Indígena.
- Art. 14. Territorio Ancestral.
- Art. 15. Recursos Naturales.
- Art. 16. Procesos de Relocalización.

Sin perjuicio de lo anterior, y conforme los fallos del Tribunal Constitucional (TC)[6] ante las consultas del poder legislativo respecto de cuales normas del Convenio 169 son autoejecutables (aquellas que no requieren adecuaciones normativas), se detallan a continuación los ámbitos de aplicación jurídica del instrumento en nuestro país. En efecto, el Tribunal Constitucional indicó que las normas autoejecutables del Convenio 169 son las siguientes:

- Artículo 6, N°1, letra a), es decir *"consultar a los pueblos interesados, mediante procedimientos apropiados y en particular a través de sus instituciones representativas, cada vez que se prevean medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarles directamente".* En este sentido, se deben considerar como medidas administrativas las propias resoluciones de calificación ambiental, que derivan del SEIA.
- Artículo 6, N°2, es decir, *"Las consultas llevadas a cabo en aplicación de este Convenio deberán efectuarse de buena fe y de una manera apropiada a las circunstancias, con la finalidad de llegar a un acuerdo o lograr el consentimiento acerca de las medidas propuestas".*

[6] *TC, Rol 309/2000 y TC, Rol 1050/2008. El primero sobre la definición de pueblos indígenas, soberanía, normas autoejecutables y programáticas. El segundo sobre los alcances de la consulta y participación en temas que afecten a los pueblos indígenas.*

- Artículo 7, N°1, es decir, *"Los pueblos interesados deberán tener el derecho de decidir sus propias prioridades en lo que atañe al proceso de desarrollo, en la medida en que éste afecte sus vidas, creencias, instituciones y bienestar espiritual y a las tierras que ocupan o utilizan de alguna manera, y de controlar, en la medida de lo posible, su propio desarrollo económico, social y cultural. Además, dichos pueblos deberán participar en la formulación, aplicación y evaluación de los planes y programas de desarrollo nacional y regional susceptibles de afectarles directamente".*

Los preceptos señalados, en tanto normativa, aplicable son considerados a través del SEIA, a través de la participación ciudadana formal establecida en la legislación ambiental. Lo anterior ha sido reconocido por el Gobierno de Chile en la Memoria acerca de las medidas adoptadas para dar efectividad a las disposiciones del Convenio presentada ante la OIT en 2010 (http://www.conadi.gob.cl).

Asimismo, el Reglamento del SEIA incorpora la participación ciudadana en las DIA y EIA (DS 40/2013, más adelante detallado), focalizando la atención en los pueblos indígenas a través de un articulado específico.

6.3.4.1. Normas del Convenio que no tienen el carácter de autoejecutables

Es importante aclarar que los fallos del TC se refieren específicamente a las materias consultadas por los parlamentarios en su oportunidad y no respecto de los demás preceptos del Convenio 169. Sin perjuicio de lo anterior, la propia ley indígena consideró en su elaboración y discusión parlamentaria de manera significativa las directrices del Convenio.

No obstante lo anterior, es necesario diferenciar el hecho de que el Convenio 169 habla de "*territorios*", entendido como "*lo que cubre la totalidad del hábitat de las regiones que los pueblos indígenas ocupan o utilizan de alguna otra manera*" (artículo 13, N°1) e implica que los Estados firmantes deberán respetar y hacer respetar la relevancia que tiene para las culturas y valores de los pueblos indígenas, su relación con las tierras o territorios.

En este sentido, el Convenio releva la necesidad de reconocer a los pueblos interesados el derecho de propiedad y de posesión sobre las tierras que tradicionalmente ocupan, así como la obligación de tomar medidas para salvaguardar el derecho a utilizar tierras que no estén exclusivamente ocupadas por población indígena, pero a las que hayan tenido tradicionalmente acceso para desarrollar sus actividades tradicionales y de subsistencia (artículos 13 y 14).

En rigor, dicho concepto ("*territorio*") es más amplio que el de "*tierra indígena*" definido por la ley 19.253[7]. Lo mismo ocurre con el concepto de ancestralidad, el cual tampoco es recogido por la ley indígena en términos similares a los señalados en el Convenio. No obstante, han sido los tribunales del país quiénes han recogido el concepto de territorio a través de fallos judiciales[8]. Este es un punto central, toda vez que el SEIA debe calificar proyectos o actividades que podrían afectar el desarrollo de los pueblos indígenas, la sustentabilidad de las tierras o las organizaciones indígenas, lo cual exige evaluar adecuadamente dichos impactos en vistas a generar medidas pertinentes a las situaciones que se busca mitigar, reparar o compensar. En este sentido, los fallos de las cortes contribuyen al mejor entendimiento, tanto de las leyes, como de los estándares vinculantes como el Convenio 169, desde el punto de vista de la evaluación ambiental de proyectos.

Por último, es necesario señalar que existe jurisprudencia por parte del Sistema Interamericano de Derechos Humanos en la protección de derechos de los pueblos indígenas, acogiendo favorablemente demandas territoriales que se insertan en el cumplimiento del Convenio 169[9].

En relación a los recursos naturales, el Convenio 169 señala que los pueblos indígenas tienen derecho a participar y decidir acerca de los recursos naturales existentes en sus tierras, incluyendo el derecho a participar en la utilización, administración y conservación de dichos recursos. Sin perjuicio de lo anterior, el TC indica que el artículo 15 Nº 2 del Convenio 169 es, en su primera parte una disposición programática (TC, Rol 309/2000).

Por otro lado, el artículo 34 del Convenio 169 indica que "*... La naturaleza y alcance de las medidas que se adopten para dar efecto al Convenio deberán determinarse con flexibilidad, teniendo en cuenta las condiciones propias de cada país",* lo cual supone un principio de flexibilidad aplicable a todas sus cláusulas.

Respecto al agua, la normativa internacional ha desarrollado normas que propenden al reconocimiento de los derechos al agua, garantizando su acceso y uso de acuerdo a prácticas culturales ancestrales.

En nuestro país, tanto el Código de Aguas (DFL 1.222/81 y Ley Nº 19.145/92) como la ley indígena, contemplan normas generales de protección de los derechos de aguas de

[7] El Tribunal Constitucional señala que "….la propiedad indígena está regulada en la Ley N° 19.253, especialmente en los artículos 12 a 14, señalando que redacción de estos incisos es programática (TC, Rol 309/2000).

[8] Sentencias de casos: Chuzmiza/ Usmagama de la Corte de Apelaciones de Iquique y confirmada por la Corte Suprema (ROL 2840/2008); Comunidad Pepiukelen contra salmonera los Fiordos de la Corte de Apelaciones de Temuco y confirmada por la Corte Suprema (ROL 5757/2010); y Cerro Colo-Colo de la Corte de Apelaciones de Concepción contra Ilustre Municipalidad de Arauco (ROL 289/2010).

[9] Caso comunidad indígena xákmok kásek vs. Paraguay (sentencia 24.08.10); caso del pueblo saramaka vs. Surinam (sentencias de 12.08.08 y 28.11.07); caso yatama vs. Nicaragua (sentencia 23.06.05); caso de la comunidad moiwana vs. Suriname (sentencia 15.06.05); caso comunidad indígena yakye axa vs. Paraguay (sentencia 17.06.05); caso de la comunidad mayagna (sumo) awas tingni vs. Nicaragua (sentencia 31.08.01); caso aloeboetoe y otros vs. Surinam (sentencia 10.09.93); caso comunidad indígena sawhoyamaxa vs. Paraguay (sentencia 29.03.06). www.politicaspublicas.net/panel/estandares/cidh.html.

las comunidades indígenas en general y de las comunidades Aimaras y Atacameñas, en particular. En efecto, las modificaciones al Código de Aguas limitaron la exploración y explotación de aguas subterráneas en zonas acuíferas que alimentan vegas y bofedales de la I y II Región del país. La ley indígena – por su parte -, en los artículos 20, 22 y 64 norman la constitución, regularización o compra de derechos de agua, así como el financiamiento de obras y protección aguas de propiedad de comunidades y personas indígenas, en especial de comunidades Aimaras y Atacameñas.

No obstante, prevalecen reclamaciones de los pueblos indígenas del norte del país para hacer efectivos derechos ancestrales sobre las aguas existentes en sus territorios históricos, en tanto la normativa vigente supedita el reconocimiento a los derechos de terceros constituidos con anterioridad (excepto en comunidades Aimaras y Atacameñas).

Por otro lado, y en caso de que la propiedad de los minerales o de los recursos del subsuelo pertenezca al Estado, el Convenio recomienda consultar para determinar si los intereses asociados a los pueblos indígenas serían perjudicados, y determinar en qué medida éstos indígenas deberán participar en los beneficios que reporten tales actividades, y percibir una indemnización equitativa por cualquier daño (artículo 15 N°1 y 2 del C.169.OIT). En particular, el Código de Minería (Ley 18.248 y sus modificaciones), define las servidumbres mineras, pero señala que el procedimiento normal de constitución de éstas – de carácter sumario - se altera en el caso de afectar predios indígenas. Conforme lo anterior, no aplican acuerdos voluntarios y se requiere la autorización de CONADI, sujeta a restricciones taxativas (relativas a la casa-habitación y al mandato general (artículo 1º de la ley indígena) que supondrían consulta previa.

Sin perjuicio de la normativa vigente asociada a relevar la situación de los pueblos indígenas en el país, la aplicación del Convenio 169 no ha estado exenta de conflictos como los demuestran los recursos que se han presentado en las cortes nacionales, ya sea por proyectos sometidos al SEIA o por situaciones asociadas a demandas territoriales.

En efecto, y según Centro de Políticas Públicas, hasta octubre de 2011 existen 22 fallos judiciales o dictámenes de la Contraloría General de la República que, invocando el Convenio 169, rechazan, aceptan o solicitan precisiones de actos administrativos y judiciales.

Con todo, la jurisprudencia en Chile muestra distintas interpretaciones respecto a la consulta y participación de los pueblos interesados, así como en aspectos territoriales

o de impacto ambiental. A continuación, se listan algunos de estos aspectos citados en los fallos de Corte Suprema citados en distintos textos[10]:

- Referencia al concepto de territorio y uso ininterrumpido (caso Chusmiza).

- En proyectos que generen los efectos del artículo 11 de la Ley 19.300, se considera a la participación ciudadana del SEIA como homologable a la consulta del Convenio 169 (casos Palguín, Celco-Mehuin).

- Existen diferencias entre la participación ciudadana del SEIA y la consulta del Convenio 169 (casos estación de transferencia Lanco y Plan Regulador de San Pedro de Atacama), abriendo la posibilidad de adaptar el procedimiento, considerar la "*susceptibilidad de la afectación directa*" (más allá de los literales del artículo 11 de la Ley 19.300) o permitir el levantamiento de efectos culturalmente diferenciados.

- No realizar consulta infringe el deber de fundamentar los actos administrativos que impactan a pueblos indígenas, afectando el derecho a la igualdad ante la ley (caso aeropuerto de Temuco).

- Es posible que en proyectos que ingresan al SEIA, vía DIA, y acreditándose la existencia de comunidades indígenas afectadas, las Cortes ordenar un EIA.

- En algunos casos, los efectos y las medidas asociadas a los pueblos indígenas se refieren a legislación sectorial, por ejemplo, forestal (caso Machi Linconao).

- Respecto de medidas administrativas relativas a proyectos que no entran al SEIA, se debe considerar la normativa sectorial (respecto de concesiones y oposición de las comunidades como procedimiento, por ejemplo).

En sentido, hay aspectos de interés de los pueblos indígenas que son relevantes de identificar en el caso de realizar algún proyecto o actividad susceptible de afectar su medio ambiente o sus sistemas de vida como insumos para una mejor evaluación ambiental de los proyectos, por ejemplo, la participación de los afectados en el diagnóstico de los impactos o respectos de efectos culturales no visualizados por las metodologías utilizadas habitualmente.

[10] *a) Diploma de Postítulo en ANTROPOLOGÍA JURÍDICA Y DERECHO INDÍGENA: Perspectivas para la aplicación del Convenio 169 de OIT. Facultad de Derecho, Escuela de Postgrado, Universidad de Chile. Presentaciones abogados: Christian de la Piedra, Matías Guiloff y Cristóbal Carmona.*
b) Las Implicancias de la Ratificación del Convenio N°169 de la OIT en Chile José Aylwin O., Cristóbal Carmona C., Matías Meza-Lopehandía G. (Editor), Hernando Silva N., Nancy Yáñez F. Segunda Edición revisada y aumentada del Documento de Trabajo N° 10, Observatorio Ciudadano en septiembre de 2009.
c) Implementación y evolución de los derechos contenidos en el convenio OIT 169. Aporte de la jurisprudencia y pronóstico de desarrollo futuro de sus implicancias ambientales y regulatorias. Andrés Fernández Alemany y Cristhian De la Piedra Ravanal. Estudios Públicos, 121 (verano 2011).

6.3.5 Decreto Supremo 66/2013 Regula la Consulta Indígena (En Toma de Razón de Contraloría)

El Decreto Supremo 66 regula y operacionaliza el Convenio 169 de la OIT, en específico regula la consulta indígena que se debe realizar cuando exista alguna afectación a estos grupos humanos. Cabe destacar que el presente decreto está en proceso de toma de razón de contraloría, por lo que aún no está vigente, sin embargo, corresponde a un antecedente a tomar en consideración al momento de analizar una posible intervención que pudiese afectar a comunidades indígenas.

Dentro de las consideraciones generales se destaca que la consulta a los pueblos indígenas se debe realizar por los organismos de la administración pública, tal como se señala en el artículo 2: *Art. 2. Consulta: "(…) deber de los órganos de la Administración del Estado y un derecho de los pueblos indígenas susceptibles de ser afectados directamente (…)".*

Por otra parte, se regula el concepto y las expectativas referidas al consentimiento pleno, libre e informado, solicitado por la autoridad: *Art. 3. Cumplimiento del deber de Consulta: "El órgano responsable deberá realizar los esfuerzos necesarios para alcanzar el acuerdo o el consentimiento pleno de los afectados dando cumplimiento a los principios de consulta a través del procedimiento establecido en este reglamento. Bajo estas condiciones, se tendrá por cumplido el deber de consulta, aún cuando no resulte posible alcanzar dicho objetivo".*

Finalmente es importante destacar que para cualquier actividad o proyecto que ingresa al SEIA, las consultas indígenas se realizaran de acuerdo a la normativa del procedimiento de evaluación ambiental: *Art 8. Medidas que califican proyectos o actividades que ingresan al SEIA: Los proyectos que requieran de consulta indígena se consultarán de acuerdo a la normativa del SEIA dentro de los plazos que el RSEIA establece.*

6.3.6 DS 40/2013 Nuevo Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA)

6.3.6.1. Participación indígena en Estudios de Impacto Ambiental

En el caso de proyectos o actividades que generan o presentan alguno de los efectos, características o circunstancias indicados en los artículos 7, 8 y 10 del RSEIA, en la medida que se afecten pueblos indígenas, se deberá desarrollar un proceso de consulta que contemplará los mecanismos apropiados para que éstos puedan participar de manera informada, según las características socioculturales propias de cada pueblo. De igual manera, se deberán establecer los procedimientos que aseguren que estos pueblos estarán informados durante el proceso de evaluación de impacto ambiental sobre las aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones que hubiese sido

objeto el Estudio de Impacto Ambiental, incluyendo la manera en que sus observaciones han sido abordadas en aquéllas.

6.3.6.2. Participación indígena en Estudio de Impacto Ambiental con pertinencia indígena y Adenda con modificaciones sustantivas

El concepto de “Proyecto con Pertinencia Indígena” corresponde a proyectos que se emplacen en tierras indígenas, áreas de desarrollo indígena (ADI) o en las cercanías de grupos humanos pertenecientes a pueblos indígenas, pero dicho proyecto en primera instancia, no generaría impactos significativos o susceptibilidad de afectación directa a las personas o grupos humanos indígenas.

En el caso de realizarse modificaciones sustantivas en los proyecto en el proceso de Adendas, se darán a conocer a los grupos humanos indígenas del área de influencia, las modificaciones sustantivas del proyecto o los impactos ambientales que éste presenta o genera, para que puedan participar de manera informada y aportar a la evaluación ambiental a través de sus observaciones (Art. 92 RSEIA). Una vez decretada la modificación sustantiva del EIA con pertinencia indígena, se deberá abrir una nueva etapa de participación ciudadana con pertinencia indígena, esta vez por 30 días, periodo en el cual se suspenderá de pleno derecho el plazo de tramitación del EIA.

6.3.6.3. DIA con cargas ambientales y pertinencia indígena y Reuniones con grupos indígenas en DIA sin cargas ambientales

El Director Regional o el Director Ejecutivo del Servicio realizarán reuniones con los grupos humanos pertenecientes a pueblos indígenas localizados en el área en que se desarrollará el proyecto o actividad, por un período no superior a treinta días contados desde la declaración de admisibilidad del proyecto. El Servicio generará un acta de cada una de las reuniones en donde se recogerán las opiniones de los referidos grupos. Las actas podrán servir de motivación de las resoluciones fundadas que pongan término anticipado al procedimiento, o bien a la Resolución de Calificación Ambiental según corresponda. Las condiciones para que las DIA tengan este tipo de participación indígena, corresponden a la cercanía o localización en:

- Tierras indígenas
- Áreas de Desarrollo Indígena
- Cercanías a grupos humanos pertenecientes a pueblos indígenas.
- Tierras indígenas
- Áreas de Desarrollo Indígena

6.3.7 Convenios e Instrumentos Internacionales Ratificados y Suscritos por Chile

En términos generales, la problemática indígena ha sido abordada por el Sistema de Naciones Unidas, en particular por la Organización de Estados Americanos a través de distintas normativas que, por su naturaleza, se diferencian respecto a si constituyen o no instrumentos vinculantes para los Estados que los suscriben.

Una mirada panorámica muestra que entre los tratados internacionales que vinculan y comprometen a los Estados a promover la dignidad, bienestar y derechos de los pueblos indígenas están:

- Declaración de Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas (2007);
- Convenio sobre Pueblos Indígenas y Tribales en Países Independientes N°169 de la Organización Internacional del Trabajo (1989);
- Declaración sobre la raza y los prejuicios raciales (1978);
- Convención Internacional sobre la Eliminación de todas las Formas de Discriminación Racial (1963).

Estas normas internacionales cubren una amplia gama de áreas de promoción de capacidades y derechos de los pueblos indígenas, entre las que se cuentan a la educación, la salud, el trabajo, y la igualdad de derechos civiles y políticos. Sin perjuicio de lo anterior, se recomienda revisar la información disponible en la Comisión Interamericana de Derechos Humanos, de la Organización de los Estados Americanos.

6.3.8 Análisis Según Alternativas Propuestas

El estudio realizado ha arrojado 4 posibilidades de solución de mejoramiento de la calidad de agua en el Valle del Lluta. Todas éstas implican la descontaminación y eliminación (o reducción) de Boro de las aguas provenientes del río Colpitas. No obstante lo anterior, no todas las alternativas presentan una interacción directa con los grupos humanas indígenas, territorios o recursos de uso ancestral. Frente a lo anterior se han definido algunas consideraciones y recomendaciones.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Tabla 6-7: Análisis legal indígena por alternativa.

Alternativa	Breve Descripción	Características de Pertinencia Indígena	Aspectos Legales Indígenas a considerar	Otros aspectos a considerar y Recomendaciones
1	Se plantea la instalación de una planta de tratamiento en la parte baja de la Cuenca del Lluta, ubicada en la parte alta del valle agrícola del río Lluta (aprox. 50 km desde la desembocadura). Su ventaja principal es su localización, ya que la planta se encuentra cerca de los puntos de consumo, y no requiere conducción de larga distancia. La dimensión de la planta queda sujeta a una planificación de crecimiento del uso de aguas de regadío de mejor calidad	El Proyecto no se emplaza en Territorio Indígena de Colpitas ni en una ADI, tampoco cercano al grupo humano indígena residente en el sector de Colpitas. El Proyecto no interactúa de manera directa con comunidades indígenas de Colpitas	No Aplica	Será necesario identificar la localización específica del Proyecto y descartar la presencia de otras comunidades indígenas en el sector. Para lo anterior, se recomienda la realización de una caracterización social del área de intervención
2	Se plantea una planta de tratamiento en la parte alta de la cuenca de la cuenca del Colpitas, que se localiza aguas abajo de las borateras, lo que permite tratar aguas con alto contenido de Boro, que corresponden exclusivamente al río Colpitas. La ventaja principal de esta alternativa es la eficiencia operativa de planta, ya que se tratará una corriente muy concentrada pero de menor volumen que la Alternativa 1, Presenta una cierta desventaja ya que es necesario incluir una conducción desde el Valle del Colpitas hasta la cabecera de la zona agrícola del Lluta (aproximadamente km 50). La planta de tratamiento puede ser modulable, lo que permite un crecimiento de acuerdo a la demanda, sin necesidad de tener capacidad ociosa, sin embargo la conducción debe ser dimensionada para capacidad máxima, La planta requiere una captación de aguas en el río Colpitas.	El Proyecto se emplaza en territorio Indígena (Sucesión Huaylla Paco) El Proyecto interactúa de manera directa con los grupos indígenas presentes en el territorio El Proyecto requiere captación de recursos hídricos del Río, implicando una potencial afectación al uso de dicho recurso de los grupos humanos indígenas.	Ley 19.253: "cuando traten materias que tengan injerencia o relación con cuestiones indígenas, deberán escuchar y considerar la opinión de las organizaciones indígenas que reconoce esta ley" Ley Nº 17.288 sobre Monumentos Nacionales Artículo 6,"Consulta Pública" Convenio 169 OIT Código de Aguas (DFL 1.222/81 y Ley Nº 19.145/92) como la ley indígena, contemplan normas generales de protección de los derechos de aguas de las comunidades indígenas en general y de las comunidades Aimaras y Atacameñas, en particular. En efecto, las modificaciones al Código de Aguas limitaron la exploración y explotación de aguas subterráneas en zonas acuíferas que alimentan vegas y bofedales de la I y II Región del país. La ley indígena – por su parte -, en los artículos 20, 22 y 64 norman la constitución, regularización o compra de derechos de agua, así como el financiamiento de obras y protección aguas de propiedad de comunidades y personas indígenas, en especial de comunidades Aimaras y Atacameñas DS 40/2013 Nuevo Reglamento de Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental	A pesar de que es la Administración Pública la que debe realizar los procesos de consulta y búsqueda de acuerdos y consentimiento con las comunidades indígenas (Convenio 169 OIT/ DS 40/2013 Nuevo Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto ambiental), es requerido que los titulares de proyectos con potencial afectación a grupos humanos indígenas desarrollen procesos de participación anticipada y voluntaria con dichas comunidades con el propósito de lograr acuerdos previos a la evaluación del proyecto o permiso sectorial. Por otra parte, al afectar de manera directa un territorio indígena ocupado de manera ancestral por sus residentes, será necesario realizar un estudio arqueológico y antropológico para descartar una posible afectación sobre sitios culturales (actuales o históricos) de dichos grupos. (Ley 17.288)

Tabla 6-7: Análisis legal indígena por alternativa. (Continuación).

Alternativa	Breve Descripción	Características de Pertinencia Indígena	Aspectos Legales Indígenas a considerar	Otros aspectos a considerar y Recomendaciones
3	Esta alternativa considera plantas de osmosis inversa que se instalarían en los predios agrícolas según sea la demanda real de agua de mejor calidad, Cada planta sería de tamaño estándar, lo que genera facilidades de mantención en base a una misma tecnología. Esta solución no requiere nuevas captaciones que las existentes, ya que el agua sería captada en la red de riego actualmente en uso. Presenta ventajas por ser infraestructura menor, adaptable a las necesidades locales, no afecta a población indígena y es coherente con las capacidades económicas locales.	El Proyecto no se emplaza en Territorio Indígena de Colpitas ni en una ADI, tampoco cercano al grupo humano indígena residente en el sector de Colpitas. El Proyecto no interactúa de manera directa con comunidades indígenas de Colpitas	No Aplica	Será necesario identificar la localización específica del Proyecto y descartar la presencia de otras comunidades indígenas en el sector. Para lo anterior, se recomienda la realización de una caracterización social del área de intervención
4	Esta alternativa considera desviar las aguas de baja concentración de elementos antes de las borateras, y conducirlas hacia la parte baja del Valle del Lluta. No requiere la instalación de planta de tratamiento. Esta solución requiere acuerdo con la población indígena, y un uso de su territorio para permitir la captación y conducción. Presenta ciertos problemas técnicos ya que el agua deberá bajar gravitacionalmente desde una alta cota, cercana a 5.000 m, para llegar a una cota inferior del orden de 1.000 m.	El Proyecto se emplaza en territorio Indígena (Sucesión Huaylla Paco) El Proyecto interactúa de manera directa con los grupos indígenas presentes en el territorio El Proyecto afecta de manera directa el acceso a los recursos hídricos del río por parte de los grupos humanos indígenas.	Ley 19.253: "cuando traten materias que tengan injerencia o relación con cuestiones indígenas, deberán escuchar y considerar la opinión de las organizaciones indígenas que reconoce esta ley" Ley Nº 17.288 sobre Monumentos Nacionales Artículo 6,"Consulta Pública" Convenio 169 OIT Código de Aguas (DFL 1.222/81 y Ley Nº 19.145/92) como la ley indígena, contemplan normas generales de protección de los derechos de aguas de las comunidades indígenas en general y de las comunidades Aimaras y Atacameñas, en particular. En efecto, las modificaciones al Código de Aguas limitaron la exploración y explotación de aguas subterráneas en zonas acuíferas que alimentan vegas y bofedales de la I y II Región del país. La ley indígena – por su parte -, en los artículos 20, 22 y 64 norman la constitución, regularización o compra de derechos de agua, así como el financiamiento de obras y protección aguas de propiedad de comunidades y personas indígenas, en especial de comunidades Aimaras y Atacameñas DS 40/2013 Nuevo Reglamento de Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental	A pesar de que es la Administración Pública la que debe realizar los procesos de consulta y búsqueda de acuerdos y consentimiento con las comunidades indígenas (Convenio 169 OIT/ DS 40/2013 Nuevo Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto ambiental), es requerido que los titulares de proyectos con potencial afectación a grupos humanos indígenas desarrollen procesos de participación anticipada y voluntaria con dichas comunidades con el propósito de lograr acuerdos previos a la evaluación del proyecto o permiso sectorial. Por otra parte, al afectar de manera directa un territorio indígena ocupado de manera ancestral por sus residentes, será necesario realizar un estudio arqueológico y antropológico para descartar una posible afectación sobre sitios culturales (actuales o históricos) de dichos grupos. (Ley 17.288)

Fuente: Elaboración propia

6.4 Evaluación de Alternativas

En principio, la evaluación de alternativas se basa en la metodología General de Preparación y Evaluación Social de Proyectos del Ministerio de Desarrollo Social, tomando como referencia el documento sobre esta materia publicado el 2013.

En primer lugar, la Guía señala la necesidad de formular el proyecto como un estado negativo, que afecta a una determinada población, y no como la falta de una solución. En este proyecto es evidente que la mala calidad el agua del río Lluta impide realizar agricultura intensiva de alto rendimiento, lo que define el problema en la forma solicitada. Las variables que definen esta mala calidad e agua son las exigidas en la NCH1.333 para agua de riego.

El área de estudio fue definida en las bases de la licitación y corresponde al punto causante de esta mala calidad de agua, que se localiza en el Valle del río Colpitas. Por su parte el área de influencia es mayor ya que abarca la zona agrícola del Valle del río Lluta, localizada en la parte baja de la cuenca del mismo nombre.

La población que se vería beneficiada por el proyecto corresponde a las personas que se dedican a la agricultura, que en su gran mayoría se agrupan en la Junta de Vigilancia del río Lluta, que tiene aproximadamente 1.000 regantes inscritos. De mantenerse las condiciones actuales se estima que esta población tendería a disminuir ya que la baja productividad no resulta atractiva ni suficiente para mejorar las condiciones socioeconómicas de la zona.

La demanda actual de agua está definida por el caudal del río Lluta, que hoy se usa integralmente en la agricultura local, determinando que frecuente el tramo bajo del río no tenga agua. En cualquier caso, la demanda actual no es sólo de mayor cantidad de agua sino en particular de mejorar la calidad del recurso. El verdadero impedimento al cambio productivo se centra preferentemente en la calidad del recurso.

Por otra parte, el aumento de la cantidad de agua, en periodos de sequía o de alta demanda, se estima que está siendo abordado por el proyecto del Embalse Chironta, de modo que en este estudio el interés se centra en la calidad del recurso.

En términos de calidad de agua, se define el objetivo del proyecto señalando que la estrategia a desarrollar debe permitir disponer de agua de bajo contenido de Boro (alrededor de 1mg/L) a partir de aguas que contienen más de 20 mg/L. El alcance de las alternativas debe ser identificar cómo lograr este nivel de calidad. Las alternativas han sido identificadas y caracterizadas en la sección precedente.

La evaluación de alternativas de un proyecto se puede realizar en distintas formas, todas las cuales envuelven juicios de carácter económico, ambiental y técnico. La base de información que permite realizar estas evaluaciones es un proyecto de ingeniería,

en cualquiera de sus etapas. En este informe las alternativas se encuentran definidas a nivel de perfil, en base a información referencial y en el juicio experto de los profesionales de AMEC.

La evaluación económica se funda en el uso de ciertos indicadores que surgen del flujo de caja y antecedentes financieros de la empresa, sin embargo para el nivel de perfil se usarán sólo costos de inversión basados en precios unitarios de componentes esenciales, o totales de cada instalación.

Por su parte, la evaluación ambiental incluye el uso de matrices causa-efecto con una ponderación de factores afectados que se expresa en un Índice de Calificación Ambiental (ICA). Esta parte no es abordada en este estudio, sin embargo se han considerado alternativas basadas en criterios de sustentabilidad ambiental.

La Tabla 6-8 muestra el desarrollo de estos criterios de evaluación, basada en una aplicación del método Delphi que AMEC ha desarrollado para estudios preliminares.

Tabla 6-8: Indicadores y escala de valoración por ámbito de evaluación.

Ámbito	Factor	Descripción	Escala Nominal	Valor
Económico	Monto Estimado Inversión	Se refiere a la inversión a nivel perfil con +/-30% de variación	Bajo	5
			Medio	3
			Alto	1
Técnico	Energía	Requerimiento de energía de las instalaciones	No requiere	5
			Renovable	3
			Otras	1
	Efectividad	Se establece una escala nominal para remoción de Boro	< 5 mg/L	5
			entre 5 y 10 mg/L	3
			>10 mg/L	1
	Autonomía Operacional	Se refiere a la capacidad de operar con baja, media o alta atención de personal	Alta	5
			Media	3
			Baja	1
	Mantención	La mantención continua se estima la más negativa, luego viene la semestral y la mejor se califica cuando es trimestral	Baja (semestral)	5
			Media (trimestral)	3
			Continua	1
	Nivel Tecnológico	La tecnología puede ser importante para fomentar mejores prácticas agrícolas y elevar el desarrollo local	Alto	5
			Medio	3
			Bajo	1
	Modularidad	La modularidad se entiende como la capacidad de crecer. En general las conducciones no son eficientes para esto, pero las plantas lo pueden ser	Si requiere	5
			No requiere	1
	Riesgo de falla	Es una forma de medir si las instalaciones son robustas o por el contrario están sujetas a detenciones por distintos motivos	Bajo	5
			Medio	3
			Alto	1
Socio - Ambiental	Impacto Social	Los impactos están calificados como negativos, y en ese sentido la nota mayor es cuando estos son bajos	Bajo	5
			Medio	3
			Alto	1
	Beneficiarios	Se trata de identificar si la solución es para todos, la mayoría o algunos de los agricultores del Lluta	Alto	5
			Medio	3
			Nbajo	1
	Propiedad de la tierra	Se califica el uso según quien sea el propietario	Uso propiedad fiscal	5
			Uso propiedad privada	3
			Uso área protegida	1
	Impacto Ambiental	Agrupa todo tipo de impactos, con una calificación general	Bajo	5
			Medio	3
			Alto	1

Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación de cada factor se usan escalas nominales que permiten obtener una nota por agrupación siguiendo una formula tal como:

$$Nota = \sum p_j f_j$$

donde:

j = 1,2,…10 (identifica cada uno de los factores sujetos a evaluación)

pj = ponderación del factor j-ésimo

fj = calificación del factor j-ésimo

La calificación se estructura en una escala de 1 a 10, siendo la menor nota el estado de menor calidad o más bajo, Esta calificación se hace con un grupo experto que en forma independiente realizan su trabajo, Luego se toman notas promedios para construir una única tabla,

La calificación de alternativas es consecuencia de la suma aditiva ponderada de las calificaciones de los respectivos factores que la conforman, Cabe destacar que este procedimiento no considera los efectos sinérgicos entre un factor y otro, los que en todo caso se estiman despreciables, En la forma señalada se obtiene un orden de preferencias de las alternativas.

Realizado este proceso de evaluación, el resultado se muestra en la Tabla 6-9.

Tabla 6-9: Evaluación de alternativas.

Indicador	Factor	Código Factor	Ponderación	Alternativas			
				1	2	3	4
Económico	Monto Estimado Inversión	F-01	31	1	1	1	1
Técnico	Energía	F-02	7	1	1	1	5
	Efectividad de remoción	F-03	7	5	5	5	5
	Autonomía Operacional	F-04	7	1	1	1	5
	Mantención	F-05	7	1	1	3	5
	Nivel Tecnológico	F-06	7	3	3	5	1
	Modularidad	F-07	7	5	1	5	1
	Riesgo de falla	F-08	7	3	3	5	5
Socio-Ambiental	Impactos Social	F-09	5	5	3	5	1
	Beneficiarios	F-10	5	5	5	1	5
	Propiedad de la tierra	F-11	5	3	3	3	1
	Impacto Ambiental	F-12	5	3	3	5	1
Suma Total Ponderada				36	30	40	36

Fuente: Elaboración propia

7.0 BASE SIG

La información digital generada a la fecha ha sido desarrollada en el sistema de coordenadas UTM Huso 19 WGS84. Los archivos disponibles hasta ahora se detallan en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1: Coberturas (shapes) a entregar.

Dataset	Información	Nombre de archivo	Formato	Resolución
A_ Hidrología	Bofedales, borateras, Cuenca río Colpitas, red hídrica	Bofedales, borateras, Cuenca río Colpitas, red hídrica	shape	
B_ Calidad_ de_agua	Puntos de monitoreo	Puntos_monitoreo	shape	
C_ Suelo	Calicatas	Calicatas	shape	
D_Sedimentos	Puntos de monitoreo	Puntos_monitoreo	shape	
E_ Geofísica	Línea de perfil geofísico	Lineas_geofisicas	shape	
F_Percepcion_ remota	Curvas de nivel AsterDEM, Subcuenca, Red de drenaje,	Curvas_nivel subcuencas_colpitas hidrologia	shape	
F_Percepcion_ remota_a	Modelo Digital de Terreno (AsterDEM V2), Pendiente, Imagen Satelital (subescena) 26 de abril 2013 – Landsat 8, Clases – derivadas de clasificación imagen Landsat 8, Componentes Principales derivados de Landsat 8, NDVI	Colpitas_DEM.tif Colpitas_Pend.tif Colpitas_B01 a Colpitas_B11 Colpitas_clases Colpitas_PCA Colpitas_NDVI	raster - TIF	30 m 30 m 30 m y 15 para Colpitas_B08 30 m 30 m
G_Topografia	Planta y secciones transversales	Colpita_dwg_Annotation Colpita_dwg_Multipatch Colpita_dwg_Point Colpita_dwg_Polygon Colpita_dwg_Polyline		
Tablas	Resultados calidad de agua, sedimentos y suelo	Campañas Data_calicata Data_sedimento		

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de la visión geográfica, química y conceptual se definieron seis campañas de monitoreo, con mediciones de calidad de aguas, calidad de suelo y geofísica, que permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

- El Boro proviene esencialmente de las borateras localizadas en la parte alta del Colpitas, traspasado al medio líquido a través de procesos de lixiviación que se ven acelerados por el nivel termal de las aguas. Esta hipótesis se basa en el hecho reconocido de que la solubilidad del Boro aumenta con la temperatura de una forma creciente, no lineal, que favorece su disolución.

- Las aguas provenientes de la Quebrada Allane no tienen el mismo nivel de concentración de Boro, debido a que las condiciones del medio, específicamente el suelo y la roca, no son similares al sitio de las borateras.

- La contaminación por Boro en el río Lluta está condicionada por la situación del río Colpitas, cuya influencia es decisiva en la calidad de sus aguas.

Como recomendaciones finales se han señalado la conveniencia de hacer estudios geofísicos en toda la cuenca del Lluta, logrando un mejor nivel de conocimiento del sistema hídrico, incluyendo sus aguas subterráneas. Asimismo se ha concluido que el estudio cubre gran parte de los requerimientos de información que permiten caracterizar la subcuenca del Colpitas, pero que igualmente e requerirá abarcar un espacio de tiempo mayor, y en lo posible mantener monitoreo permanentes de variables físico químicas involucradas en la calidad del agua. Un estudio integrado de la cuenca del Lluta puede ser una herramienta que facilite la toma de decisiones públicas y privadas.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

9.0 REFERNCIAS

AguaEx SpA. 2013. *Reporte Técnico: Tomografía Eléctrica para el estudio de la Cuenca del Rio Colpitas*. Presentado a AMEC International Ingeniería y Construcción Ltda. Diciembre.

Ahumada, M., & Faúndez, L., 2009. *Guía Descriptiva de los sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres de la Ecorregión Altiplánica (SVAHT)*. Santiago: Servicio Agrícola y Ganadero, Ministerio de Agricultura.

Albornoz, F., Torres, A., Tapia, M., & Acevedo, E., 2007. Cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum mil.) hidropónico con agua desalinizada y desboroficada en el Valle de Lluta. *IDESIA*, 29 (3), pp. 7-16.

APHA, AWWA, & WEF, 1999. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 20° Ed. Washington: APHA, AWWA, WEF.

Aquaconsult (2006). *Informe N°1: Caracterización Hidrogeológica, Proyecto Los Pumas, XV Región de Arica y Parinacota*. Santiago.

Aqueous Solutions LLC, 2012. *The Geochemist's Workbench*. (version 9.0). [Software] Aqueous Solutions LLC.

Aqueous Solutions LLC, s.f. [Imagen online] Disponible en: <http://www.gwb.com/diagrams.php> [Accedido el 18 de febrero de 2014]

Ayres, R.S., & Westcot, D.W., 1989. *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Bastías, E., Díaz, M., Pacheco, P., Bustos, R., & Hurtado, E., 2011. Caracaterización del maíz "Lluteño" (*Zea mays L.* tipo amylacea) proveniente del norte de Chile, tolerante a NaCl y exceso de boro, como una alternativa para la producción de bioenergía. *IDESIA*, 29 (3), pp. 7-16.

Bentley, L. & Gharibi, M., 2004. Two- and Three-Dimensional Electrical Resistivity Imaging at a Heterogeneous Remediation Site. *Geophysics*, 69, pp. 674-680.

Bingham, F.T., & Page, A.L., 1971. Specific character of Boron Adsorption by an Amorphous Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 35 (6), pp. 892-893.

Brown, P.H., Bellaloui, N., Wimmer, M.A., Bassil, E.S., Ruiz, J., Hu, H., Pfeffer, H., Dannel, F., & Römheld, V., 2002. Boron in Plant Biology. *Plant Biology*, 4, pp. 211-229.

Bundschuh, J., Fuertes, A., Baudino, G., García, R., & Blake, K.D., 1994. Investigating and modelling transport and adsorption in the groundwater of Lerma Valley, Argentina.

IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Association of Hydrological Sciences, 219, pp. 185-193.

CADE-IDEPE, 2004. *Cuenca del Río Lluta, diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad*. Santiago: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

Chamberlin, R.T., 1912. The physical setting of the Chilean borate deposits. *The Journal of Geology*, 20, pp. 763-768.

Chambers, J.E., Kuras, O., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D., & Hollands J., 2006. Electrical Resistivity Tomography Applied to Geological, Hydrogeological, and Engineering Investigations at a Former Waste Disposal Site. *Geophysics*, 71, pp. B231-B239.

Chong, G., Pueyo, J.J., & Demergasso, C., 2000. Los yacimientos de boratos de Chile. *Andean Geology*, 27 (1), pp. 99-119.

Chorley, R.J. (ed), 1969. *Introduction to Fluvial Processes*. Massachusetts: Methuen.

CORFO, 2000. Desarrollo de la Ingeniería básica de tratamiento para la eliminación de boro de las aguas servidas de Arica. Santiago: Gerencia de Programas Estratégicos, CORFO.

CNR, 2013. Comisión Nacional de Riego Impulsa Proyectos para Mejorar la Calidad del Agua. Año 2, N°5. Santiago: Comisión Nacional de Riego.

Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133 (3465), pp. 1702-1703.

Dannel, F., Pfeffer, H., & Römheld, V., 2002. Update on boron in higher plant - Uptake, primary translocation and compartmentation. *Plant Biology*, 4, pp. 193-204.

Descloitres, M., Laurent, R., Sekhar, M., Legchenko, A., Braun, J-J., Mohman Kumar, M.S., & Subramanian, S., 2008. Characterization of Seasonal Local Recharge Using Electrical Resistivity Tomography and Magnetic Resonance Sounding. *Hydrological Processes*, 22, pp. 384-394.

DGA, 1986. *Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000*. Santiago: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obas Públicas.

DGA, 2010. *Plan de Acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota (Documento Propuesta Borrador). SDT N° 306*. Santiago: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

DICTUC, 2008a. *Hidrología Regional del altiplano de Chile. Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II, y III. Etapa1: Informe Final Parte III. SIT N° 157*. Santiago: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

DICTUC, 2008b. *Evaluación Preliminar De Alternativas De Mitigación De Contaminantes En El Río Lluta A Partir De Una Caracterización De Las Fuentes De Contaminación*. Santiago: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

Doussoulin, E., & Quezada, C., 2008. *Suelos en la región desértica de Chile.* En: Quezada, C., Sandoval, M., & Zagal, E., ed. Manejo de suelos en zonas áridas. Concepción: Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Servicio Agrícola y Ganadero.

Dussaubat, S., & Vargas, X., 2005. Módulo: Aforo en un cauce natural. Santiago: Proyecto MECESUP UCh 0303, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

Eaton F.M., & Wilcox, L.V., 1939. *The Behavior of Boron in Soils*. Washington DC: United States Department of Agriculture.

Energía Andina, 2013. *Antecedentes hidroquímicos e isotópicos de manatiales fríos, precipitaciones y escorrentías, Proyecto Geotérmico Colpitas*. Santiago: Energía Andina.

EPA, 2008. *Drinking Water Health Advisory For Boron*. Washington, DC: Environmental Protection Agency.

Ericksen, G.E., Mrose, M.E., Marinenko, J.W., & McGee, J.J., 1986. Mineralogical studies of the nitrates deposits of chile. V. Iquiquite $Na_4K_3Mg(CrO_4)B_{24}O_3(OH)_{12}H_2O$, a new saline mineral. *American Mineralogist*, 71, pp. 830-836.

FIA, 2009. Resultados y lecciones en sistema para reducir la concentración de Boro en aguas de riego. Santiago: Proyecto de Innovación XV Región de Arica y Parinacota. Serie Experiencias de Innovación para el emprendimiento Agrario. Fundación para la Innovación Agraria.

Fitzgerald, D., 1886. *Evaporation*. Transactions of the American Society of Civil Engineers.

Garcés, I., Reyes, J., Geraldo, C., & yunis, F., 2003. *Estudio experimental de la solubilidad de Ulexita en agua y determinación de correlaciones generalizadas para medir su densidad, viscosidad, e índices de refracción*. Antofagasta: Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Antofagasta.

Garret, D.E., 1998. *Borates handbook of deposits, processing, properties, and use*. San Diego: Academic Press.

Hadas, A., & Hagin, J., 1972. Boron Adsoprtion By soils As Influenced By Potassium. *Soil Science*, 113 (3), pp. 189-193.

Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., & Nelson, W.L., 1999. *Soil Fertility and Fertilizers: an Introduction to Nutrient Management*. 6° Ed. New Jersey: Prentice Hall, Inc.

Herrera, C., Pueyo, J.J., Sáez, A., & Valero-Garcés, B.L., 2006. Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. *Revista Geológica de Chile*, 33 (2), pp. 299-325.

Hernández, A., 1999. Características químicas e hídricas de los suelos de la parte baja del Valle de Azapa, I Región de Tarapacá. *IDESIA*, 16, pp. 7-15.

Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to cuantitative geomorfology. Geological Society of America Bulletin, 56, pp. 275-370.

Inan, K., Dunham, A.C., & Esson J., 1973. *Mineralogy, Chemistry and Origin of Kirka Borate Deposits. Eskisehir Province, Turkey Transactions. Section B. Institution of Mining and Metallurgy, B114-B123*. Nottingham.

INGENDESA, 1993a. *Consultoría DEP-002 Análisis de Descontaminación y embalse en río Lluta. Volumen 3*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.

INGENDESA, 1993b. *Anexo A: Medidas De Concentración De Contaminantes En La Cuenca Del Río Lluta. En: Consultoría DEP-002 Análisis De Descontaminación Y Embalse En Río Lluta*. Santiago: Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas.

INN, 1978. *NCh 1333.Of78 Modificada en 1987 Requisitos de calidad del agua para diferentes usos*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.

INN, 1996a. *NCh 441/2.Of96 Calidad del agua - Muestreo - Parte 2: Guía sobre técnicas de muestreo*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.

INN, 1996b. *NCh 441/3.Of96 Calidad del agua - Muestreo - Parte 3: Guía sobre la preservación y manejo de las muestras*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.

INN, 1998. *NCh 441/6.Of98 Calidad del agua - Muestreo - Parte 6: Guía para el muestreo de ríos y cursos de agua*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.

INN, 2005. *NCh 409/1.Of2005 Agua potable-Parte 1-Requisitos*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.

Jensen M.E., Burman, R.D., & Allen, R.G. (ed), 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. New York: American Society of Civil Engineers.

Kistler, R.B., & Helvaci, C., 1994. *Boron and Borates*. En: Industrial & Mineral Rocks Commodities, Markets, and Uses. Littleton: Society for Mining, Metallurgic, And Exploration, Inc.

Koc, C., 2007. Effects on environment and agriculture of geothermal wastewater and boron pollution in Great Menderes Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 125 (1-3), pp. 377-388.

Koch, K.M., 2004. *Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) together with Tracer Data to Identify Hydrological Process Areas at a Surface Water/Groundwater Test Site: St. Wilhelm, Black Forest Mountains, Germany*. Tesis. Friburgo: Instituto de Hidrología Albert Ludwig, Universidad de Friburgo.

Kopf, A., & Deyhle, A., 2002. Back to the roots: boron geochemistry of mud volcanoes and its implications for mobilization depth and global B cycling. *Chemical Geology*, 192, pp. 195-201.

Kosmas, C., & Moustakas, N., 1990. Hydraulic conductivity and leaching of an organic saline-sodic soil. *Geoderma*, 46, pp.363-370.

Läuchili, A., 2002. Functions of boron in higher plants: recent advances and open questions. *Plant Biology*, 4, pp.190-192.

Lid, D.R., (Ed.), 2008-2009. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 89° Ed. Versión de Internet 2009. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis.

Mazuela, P., 2011. Agricultura sustentable. *IDESIA*, 29 (3), pp. 3-5.

Metcalf & Eddy, 1995. *Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales*. Barcelona: Labor.

Microsoft, 2007. *Microsoft Office 2007*. (versión 12.0.6607.1000). [Software] Microsoft.

Musy, A., 2001. *E-drologie*. [Online] Disponible en: <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>

Navarrete, A., 2012. *Origen y Comportamiento del CO2 Difuso del Suelo en los Sistemas Geotérmicos de Juncalito (68°55'50"-68°38'20"W y 26°25'-26°31'30"S, Región de Atacama) y Colpitas (69°29'30"-69°23'30"W y 17°50'30"-18°S, Región de Arica y Parinacota), Chile*. Tesis: Geólogo. Santiago: Universidad de Chile.

Niemeyer, 1968. *Estudio del Valle del Río Lluta*. Santiago: Junta de Adelanto de Arica, Dirección de riego, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas.

Nies, N.P., & Hulbert, R.W., 1967. Solubility Isotherms in the system Sodium Oxide-Boric Oxide-Water. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 12 (3), pp. 303-3013.

ODEPA, 2004. Variaciones en el uso del suelo agropecuario y forestal chileno: comparación de los censos agropecuarios de 1976, 1997, y 2007. Agricultura en Cifras N° 1. Santiago: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Ministerio de Agricultura.

Parkhurst, D. & Appelo, T., 2013. *PHREEQC for Windows*. (versión 2.18.00 basado en PHREEQC-2 versión 2.18.3-5570). [Software] United States Geological Survey.

Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25 (6), pp. 914-928.

Primas Ingeniería Ltda., 1992. *Análisis Estadístico de Caudales en los Ríos de Chile*.

Rahman, I., 2009. *Removal of boron from produced water by co-precipitation / adsorption for reverse osmosis concentrate*. Tesis de Magister. California Polytechnic State University.

Riquelme-Garcés A., González-Vallejos, F., Contreras-Luque, P., Mazuela, P., 2013. Management of vegetable crops and its effect on the sustainability of a coastal valley in the Atacama desert, Chile. Manejo del cultivo de hortalizas y su efecto en la sustentabilidad de un valle costero del desierto de Atacama, Chile. *IDESIA*, 31 (3), pp. 113-117.

Rodgers, K.A., Greatrex, R., Hyland, M., Simmons, S.F., & Browne, P.R., 2002. A modern evaporitic occurrence of teruggite, $Ca_4MgB_{12}As_2O_{28}{\cdot}18H_2O$, and nobleite $CaB_6O_{10}{\cdot}4H_2O$, from the El Tatio geothermal field, Antofagasta Province, Chile. *Mineralogical Magazine*, 66 (2), pp.253-259.

Sernageomin, 2003. *Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Escala 1:1.000.000*. Santiago: Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.

Sernageomin, 2004. *Carta Geológica de Chile: Serie Geología Básica. No. 84 (Hoja Arica, Región de Tarapacá)*. Escala 1:250.000. Santiago: Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.

Sernageomin, 2012. *Carta Geológica de Chile: Serie Geología Básica. Nos. 135-136 (Cartas Visviri y Villa Industrial, Región de Arica y Parinacota)*. Escala 1:100.000. Santiago: Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería.

SGS, 2013. *Propuesta ENVISAN 214927(2)/2013*. Santiago: SGS.

Stiff, H.A., 1951. The interpretation of chemical water analyses by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3 (10), pp. 15-17.

Strahler, A., 1952. Hypsometric analysis of erosional topography. *Bulletin of Geological Society of America*, 63, pp. 1117-1142.

Strahler, A., 1986. *Geografía Física*. Barcelona: Omega.

Torres, A., 2008. Eficiencia del Uso del Agua en la Agricultura. IDESIA, 26 (3), pp. 5-6.

Torres, A., & Acevedo, E., 2008. El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los Valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile, IDESIA, 26 (3), pp. 31-44.

Torres, A., & Vásquez, R., 2013. Prospección de la estimación de la evapotranspiración de referencia, bajo las condiciones del valle de Chaca, Arica-Chile. IDESIA, 31 (2), pp. 25-29.

UC, 2012. *Hidrología. Proyecto Mejoramiento Río Azufre en la cuenca del Río Lluta. Informe Técnico de Avance III. CORFO 09CN14-5709*. Santiago: CORFO.

WHO, 1998. *Boron in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. En: Guidelines for drinking-water quality. Addendum to Vol. 2. Health criteria and other supporting information. 2° Ed. Geneva: World Health Organization.

Yazbeck, C., Kloppmann, W., & Cottier, R., 2005. Health impact evaluation of boron in drinking water: a geographical risk assessment in Northern France. *Environmental Geochemistry and Health*, 27, pp. 419-427.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

10.0 ANEXOS

10.1 Anexo A: Hidrología.

10.2 Anexo B: Topografía

10.3 Anexo C: Geofísica

10.4 Anexo D: Calidad del Agua

10.5 Anexo E: Calidad del Suelo y Sedimentos

10.6 Anexo F: Balance Hidroquímico

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco