

CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS NATURALES

**DETERMINACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS DE EXISTENCIA DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LOS INTERFLUVIOS DE LOS RÍOS ELQUI, LIMARÍ Y
CHOAPA**

INFORME FINAL



ENERO – 2004

Todos los contenidos Copyright ©2004 CIREN.

CONTENIDO

	Pag.
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO	4
2.1 Objetivos Específicos	4
3. AREA DE ESTUDIO	5
4. SÍNTESIS DE RESULTADOS	7
4.1 Modelo de exploración de aguas subterráneas para zonas de recarga pluvial.	7
4.2 Cartografía de índices climático, de infiltración superficial, litológico y de lineamientos para cada microcuenca.	8
4.3 Cartografía de los índices de recarga (IPRA) y de almacenamiento (IPEA)	10
4.4 Zonas Probables de Existencia de Aguas Subterráneas (ZPA)	10
4.5 Cartografía de ZPA jerarquizadas de acuerdo a la capacidad de recarga y de almacenamiento del acuífero	13
4.6 Cartografía de Zonas Hidrogeológicas Homogéneas (ZHH) para el área de estudio.	15
4.7 Resultados de validación	17
4.8 Resultados de hidrogeología y la aplicación del MODFLOW	19
4.9 Difusión y Transferencia	21
5 SÍNTESIS DE ACTIVIDADES Y MÉTODOS	23
5.1 Etapa 1. Coordinación	23
5.2 Etapa 2. Definición del Método de Exploración	23
5.2.1 Metodología General para la obtención de las ZPA	24
5.3 Etapa 3. Desarrollo del Modelo exploratorio aguas subterráneas	26
5.4 Etapa 4. Determinación de ZHH y Pozo Modal	27
5.4.1 Metodología General de Zonas Hidrológicas Homogéneas (ZHH)	27
5.4.2 Metodología de Validación	28
5.5 Etapa 5. Resultados y transferencia	29
6 CONCLUSIONES	31
7. VIGENCIA DE LOS SUPUESTOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA	33
ANEXOS	
ANEXO 2 RESULTADOS	

Nombre del proyecto	<i>"Determinación de zonas homogéneas de existencia de aguas subterráneas en los interfluvios de los ríos Elquí, Limarí y Choapa"</i>
Director de Proyecto	<i>Marion Espinosa T.</i>
Código	<i>C7XC-03</i>
Fecha	<i>15 de Enero del 2004</i>

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto "Determinación de zonas homogéneas de existencia de aguas subterráneas en los interfluvios de los ríos Elquí, Limarí y Choapa" fue seleccionado en el VII concurso FDI, para iniciar su ejecución con fecha 30 de Noviembre del 2001, según contrato CORFO-CIREN, Resolución Exenta N° 987 del 5 de Noviembre del 2001 y modificado de acuerdo a Ord. N° 1920 de fecha 1 de abril del 2002. Contó con la participación, como entidades asociadas, del Ministerio de Bienes Nacionales a través de su Secretaría Regional Ministerial de la IV Región, de la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura de la IV Región y de la Comisión Nacional de Riego.

La finalidad del proyecto estuvo centrada en establecer una metodología con base en la utilización de datos satelitales y auxiliares, considerando como unidad de análisis las microcuencas, que permitiera maximizar la eficiencia de prospección de aguas subterráneas en zonas semiáridas (interfluvios), focalizando y priorizando las zonas con mayor potencial de agua subterránea, y con ello asegurar la disponibilidad del recurso a las comunidades agrícolas.

Los principales índices desarrollados corresponden a los llamados índice potencial de recarga (IPRA) y el índice potencial de almacenamiento de agua (IPEA), calculados para cada microcuenca del área de estudio.

Los índices anteriores tienen su base en la integración de los factores de infiltración, lineamientos, hidrogeológicos, geomorfológicos, topográficos, vegetacionales y climáticos, los que fueron obtenidos y modelados a partir de datos satelitales, tanto ópticos, termales y de microondas.

La investigación realizada en esta línea permitió determinar una metodología para definir zonas probables de existencia de agua subterránea para facilitar la exploración de áreas extensas, reduciendo significativamente los costos de exploración que en la actualidad se realizan con metodologías tradicionales. Esta propuesta beneficiará directamente a las instituciones públicas relacionadas con el tema e indirectamente a las propias Comunidades Agrícolas, que se ubican en la zona semiárida del norte de Chile.

El presente documento corresponde al Informe Final e informa la metodología desarrollada y resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto.

El equipo técnico del proyecto estuvo integrado por:

Marion Espinosa T.	Ing. Agrónomo, Director
Arnoldo Ortiz R.	Geólogo, Director Alterno
Ana M. Bustamante	Ingeniero Civil
Paz M. Vargas H.	Cartógrafo
Douglas Díaz M.	Operador SIG

La ejecución del proyecto estuvo asesorada en los aspectos técnicos por los siguientes especialistas:

Roberto Castro R.	Ing. Forestal, Dr. en Percepción Remota, SIG y Modelamiento
Layto Dalannais	Geólogo, especialista en Hidrogeología
Gullibert Novoa G.	Geólogo, especialista en Hidrogeología

El Comité Técnico Coordinador estuvo integrado por CIREN y las entidades asociadas al proyecto, a través de los siguientes representantes:

Heriberto Pinto R.	Gerente Operaciones CIREN
Marion Espinosa T.	Director de Proyecto CIREN
Arnoldo Ortiz R.	Director Alterno de Proyecto CIREN
Teresa Guerrero T.	Coordinadora por SEREMI Bienes Nacionales IV Región
Pedro Hernández	SEREMI de Agricultura IV Región
Juan P. Schuster	Coordinador por la Comisión Nacional de Riego

2. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Desarrollar un modelo de exploración de áreas de interés de agua subterránea para los sectores de las Comunidades Agrícolas de los interfluvios de los ríos Elquí, Limarí y Choapa, IV Región, que integre componentes geológicas, hidrogeológicas, geomorfológicas, climáticas y vegetacionales, provenientes de datos satelitales y de datos de terreno, con la finalidad de disminuir los costos de prospección y disponer de una fuente de recursos hídricos que tienda a la mejoría de la capacidad productiva de los suelos en los sectores de interfluvios y permitir la expansión de los resultados del modelo a otros sectores con estas características.

2.1 Objetivos Específicos

Definir, desarrollar y aplicar un modelo de prospección de zonas probables de existencia de aguas subterráneas (ZPA), en áreas de interfluvio, a través de la integración de datos provenientes de imágenes satelitales y de terreno.

Validar las zonas probables de existencia de agua (ZPA) en terreno con información de pozos existentes. Calibrar y ajustar el Modelo definido en el objetivo 1.

Determinar Zonas Hidrogeológicas Homogéneas (Z.H.H) y Pozos Tipo del área de estudio.

Validar las Z.H.H mediante métodos geofísicos de exploración y perforación de pozos de estudio.

3. AREA DE ESTUDIO

Considerando la ubicación de las comunidades agrícolas y el objetivo general del proyecto, así como la metodología del mismo, se determinó definir los límites y la superficie del área de estudio en base al concepto de cuenca hidrográfica (CONAF, 1996) quedando delimitada como se muestra en la figura 1.

En la primera etapa se definieron las cuencas donde se asientan trece comunidades agrícolas del estudio, considerando además, como criterio para definir el área, la existencia de datos bases como pozos, hidrogeología y otros de interés.

Del análisis de los antecedentes se definió un total de 12 subcuencas de segundo y tercer orden correspondientes al área de estudio, las cuales fueron subdivididas hasta el quinto orden, para constituir 745 microcuencas que conformaron las unidades básicas de análisis. Estas microcuencas cubren una superficie total de 273.951,1 ha. en la cual se ubican 39 Comunidades Agrícolas.

Cabe señalar que las Comunidades Agrícolas insertas en el área de estudio abarcan una superficie total de 192.143,3 ha. (figura 2). La diferencia en superficie está constituida por sectores de comunidades agrícolas que fueron parceladas y pasaron al sector privado y superficie ocupada por los valles de los ríos principales.

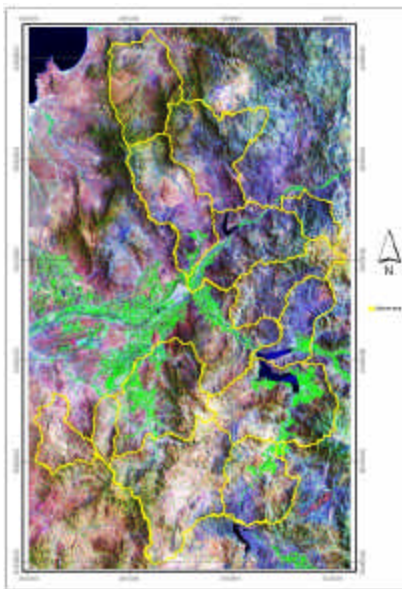


Figura 1: Área de Estudio

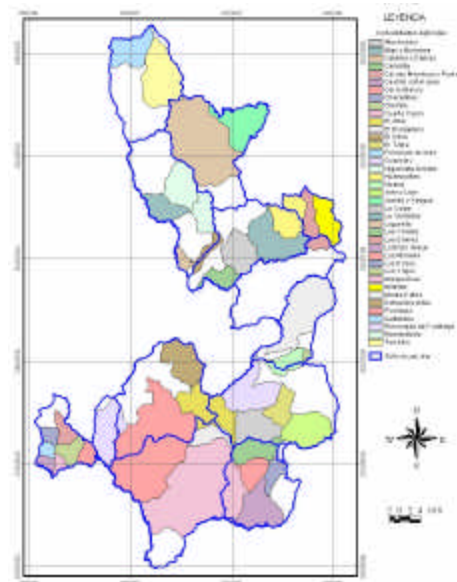


Figura 2. Comunidades Agrícolas del área de estudio

En la Tabla 1 se presenta las comunidades incluidas en el área de estudio, la superficie que ocupa cada una de ellas y el nombre de la subcuenca a la que pertenecen.

Tabla 1: Comunidades Agrícolas y Subcuencas área de estudio

Nombre Comunidad	Superficie (Ha)	Subcuenca a la que pertenece
Atunhuaico	4.643,5	Río Cogotí entre Río Guatulame y Embalse Cogotí
Blas y Bulrreme	6.687,8	Río Hurtado entre Qda. El Pangue y Río Limarí
Caldera y Damas	17.019,8	Quebrada Higuierilla
Canelilla	2.185,5	Río Hurtado entre Qda. El Pangue y Río Limarí
Carrizo Mendoza y Romero	3.102,4	Río Hurtado entre Río Chape y Quebrada El Pangue
Castillo y Mal paso	5.451,6	Río Cogotí entre Río Guatulame y Embalse Cogotí
Cerro Blanco	1.257,8	Estero Punitaqui entre Quebrada Espinal y Río Limarí
Chacarillas	1.759,0	Río Cogotí entre Río Guatulame y Embalse cogotí
Chirrilla	345,7	Río Grande entre Río Ponio y Río Guatulame
Cuarto Cajón	736,6	Estero Punitaqui entre Quebrada Espinal y Río Limarí
El Altar	6.425,0	E. Punitaqui entre Qda. Los Mantos y E. Las Majadas
El Divisadero	2.217,9	E. Punitaqui entre Qda. Los Mantos y E. Las Majadas
El Olivo	1.338,1	Río Hurtado entre Qda. El Pangue y Río Limarí
El Tome	2.752,6	Río Guatulame
Fernando Álvarez	822,8	Estero Punitaqui entre Quebrada Espinal y Río Limarí
Guanillas	6.610,6	Río Guatulame
Higueritas Unidas	4.383,1	Quebrada El Ingenio
Huampullas	4.518,0	Río Hurtado entre Qda. El Pangue y Río Limarí
Huana	2.353,6	Río Grande entre Río Ponio y Río Guatulame
Jara o Laja	5.298,8	Río Guatulame
Jarrilla y Azogue	5.855,1	Quebrada Higuierilla
La Coipa	4.263,0	Río Hurtado entre Qda. El Pangue y Río Limarí
La Verdiona	3.095,7	Río Cogotí entre Río Guatulame y Embalse Cogotí
Lagunilla	1.064,7	Río Cogotí entre Río Guatulame y Embalse Cogotí
Las Cardas	3.417,4	Río Cogotí entre Río Guatulame y Embalse Cogotí
Las Damas	1.640,7	Estero Punitaqui entre Quebrada Espinal y Río Limarí
Lorenzo Araya	860,1	Estero Punitaqui entre Quebrada Espinal y Río Limarí
Los Morales	2.528,3	Río Cogotí entre Río Guatulame y Embalse Cogotí
Los Pozos	1.034,0	Estero Punitaqui entre Quebrada Espinal y Río Limarí
Los Trigos	1.942,2	Estero Punitaqui entre Quebrada Espinal y Río Limarí
Manquehua	24.194,3	Río Cogotí entre Río Guatulame y Embalse Cogotí
Minillas	3.397,2	Río Hurtado entre Río Chape y Qda. El Pangue
Monte Patria	10.113,1	Río Grande entre Río Ponio y Río Guatulame
Potreriillo Alto	5.055,1	E. Punitaqui entre Qda. Los Mantos y E. Las Majadas
Punitaqui	23.431,6	E. Punitaqui entre Qda. Los Mantos y E. Las Majadas
Quitallaco	4.347,6	Estero El Culebrón y Qda. El Romeral
Rinconada de Punitaqui	5.533,8	Estero Punitaqui entre E. Las Majadas y Qda. Espinal
Romeralcillo	2.703,7	Quebradas Higuierilla y del Ingenio
Tambillo	7.756,0	Estero El Culebrón y Qda. El Romeral
Superficie Total	192.143,3	

4. SÍNTESIS DE RESULTADOS

De acuerdo al objetivo general planteado, el proyecto logró desarrollar, aplicar y validar una metodología de exploración de aguas subterráneas, cuya base se encuentra por una parte, en el análisis e integración de datos satelitales, tanto ópticos, como termal y de microondas y, por otra, considera, como unidad de estudio, el concepto de microcuenca para determinar las zonas con mayor probabilidad de existencia de agua subterránea (ZPA).

La metodología desarrollada es aplicable a zonas de características similares, donde el régimen de recarga es pluvial.

De esta forma, los principales resultados se pueden resumir de la siguiente forma:

4.1 Modelo de exploración de aguas subterráneas para zonas de recarga pluvial.

El modelo se basa en 4 subíndices: climático (ICLI), Infiltración superficial (IIS), lineamientos (ILIN) y Litológico (ILIT) espacializados de una manera continua (en base a celdas de 625 metros cuadrados) y calculados para cada microcuenca de la siguiente forma:

Índice Climático (ICLI). Este subíndice indica la disponibilidad de agua existente en las distintas zonas del área de estudio.

$$\text{ICLI} = \text{PP} - \text{ETp}$$

donde : PP corresponde a la precipitación y ETp a la evapotranspiración.

Índice de Infiltración Superficial (IIS). Este índice recoge la capacidad de infiltración probable y relativa que tienen los procesos de superficie de un determinado lugar y que influyen en la recarga de acuíferos. Incluye las variables de forma de la microcuenca (compacidad), densidad de drenaje natural, cobertura vegetal (Cobveg) y altitud y pendiente de la microcuenca.

$$\text{IIS} = (\text{Compacidad} * \text{Densidad de drenaje} * \text{Cobveg}) / \text{Coeficiente Orográfico}$$

Índice de lineamientos (ILIN). Da cuenta de la densidad de fallas y estructuras lineales del paisaje que permiten explicar la probabilidad de existencia de acuíferos, toda vez que estas estructuras se relacionan con la composición de las rocas, la formación y conexiones de los estratos en un determinado espacio.

$$\text{ILIN} = \text{Longitud} * \text{Nº intersecciones} * \text{Nº cruces} * \text{Orientación}$$

Índice Litológico (ILIT). Indica la mayor o menor capacidad de almacenamiento o permeabilidad al agua de los componentes del suelo de acuerdo a su naturaleza y composición mineralógica. Se determinaron 8 clases desde la perspectiva del almacenamiento y fue ponderado por el valor de la pendiente.

A partir de los cuatros subíndices mencionados, se obtiene la recarga y almacenamiento de la microcuencas calculados a través de los siguientes índices:

- i) **Índice Potencial de Recarga (IPRA)** que se calcula a través de las siguiente expresión:

$$IPRA = IIS / ICLI$$

- ii) **Índice Potencial de Almacenamiento de Acuífero (IPEA)** que se calcula como sigue:

$$IPEA = ILIT * ILIN$$

Ambos índices se jerarquizan en 4 rangos de probabilidad: 1.Baja; 2. Media; 3. Alta y; 4. Muy Alta. La amplitud de los rangos se determina a partir de los puntos modales del histograma.

Finalmente, el modelo de Zonas Probables de Existencia de Agua Subterránea corresponde a una relación matricial entre los índices de recarga y de almacenamiento, de acuerdo a la tabla 2.

Tabla 2. Modelo matricial que define las clases de ZPA.

IPRA \ IPEA	1	2	3	4
1	1	1	2	2
2	2	2	3	3
3	2	3	3	3
4	2	3	4	4

4.2 Cartografía de índices climático, de infiltración superficial, litológico y de lineamientos para cada microcuenca.

De acuerdo al modelo detallado anteriormente, se obtuvo como resultado cartografía de los 4 subíndices para cada microcuenca (Figuras 3, 4, 5 y 6).

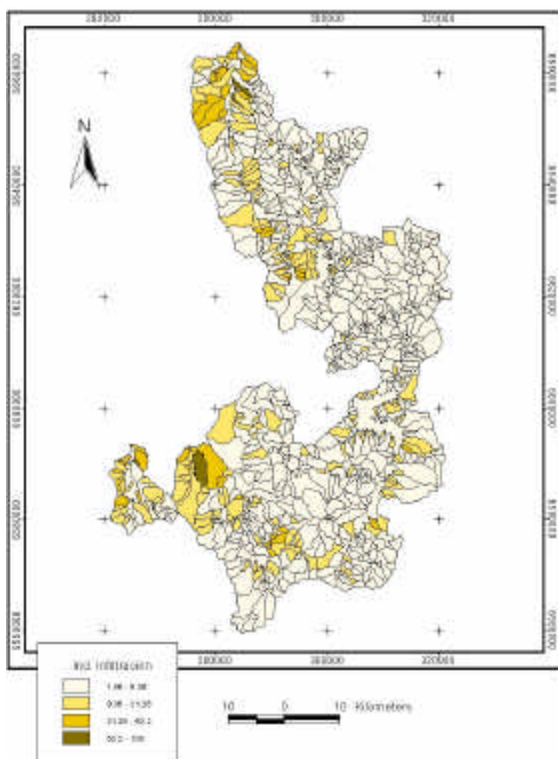


Figura 3. Índice de Infiltración Superficial (IISUP).

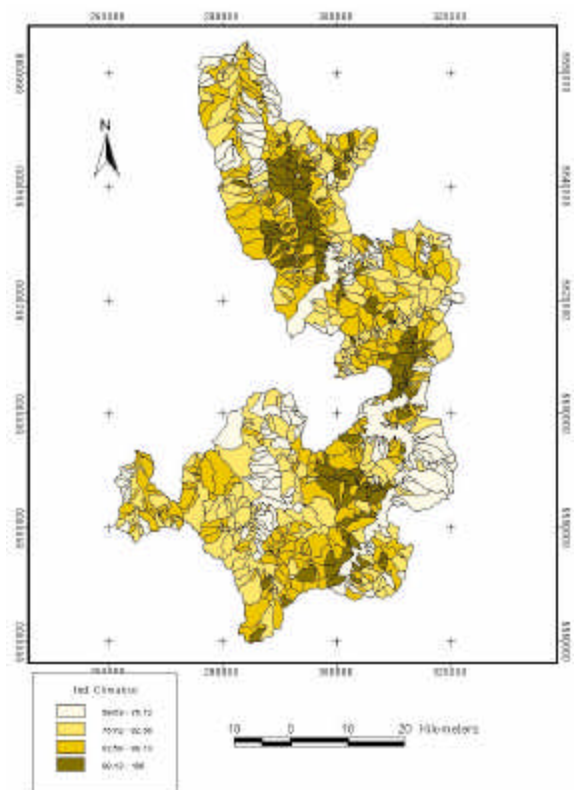


Figura 4. Índice Climático (ICLI)

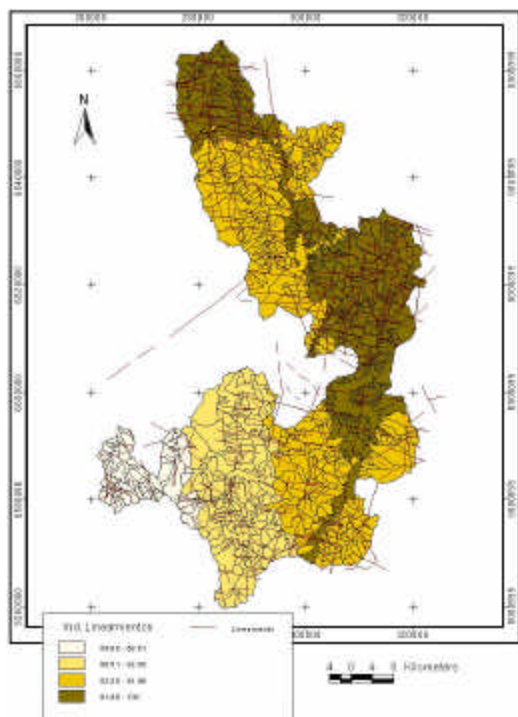


Figura 5. Índice de Lineamientos (ILIN)

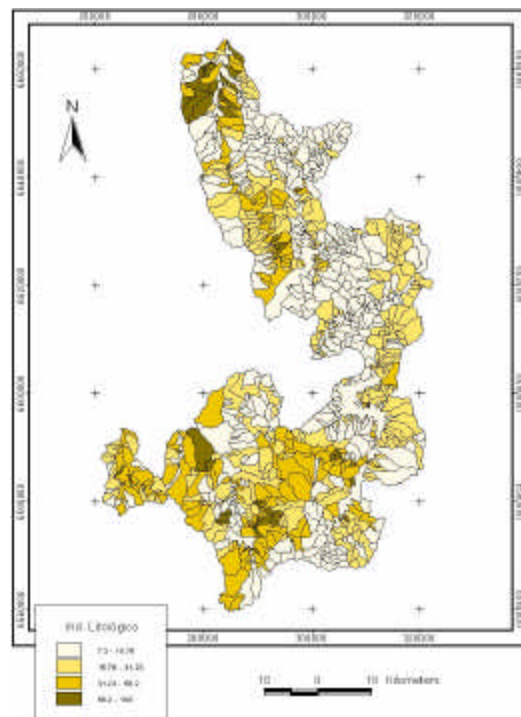


Figura 6. Índice Litológico (ILIT)

4.3 Cartografía de los índices de recarga (IPRA) y de almacenamiento (IPEA)

En las figuras 7 y 8 se presenta la espacialización de los índices de recarga y almacenamiento para cada microcuenca.

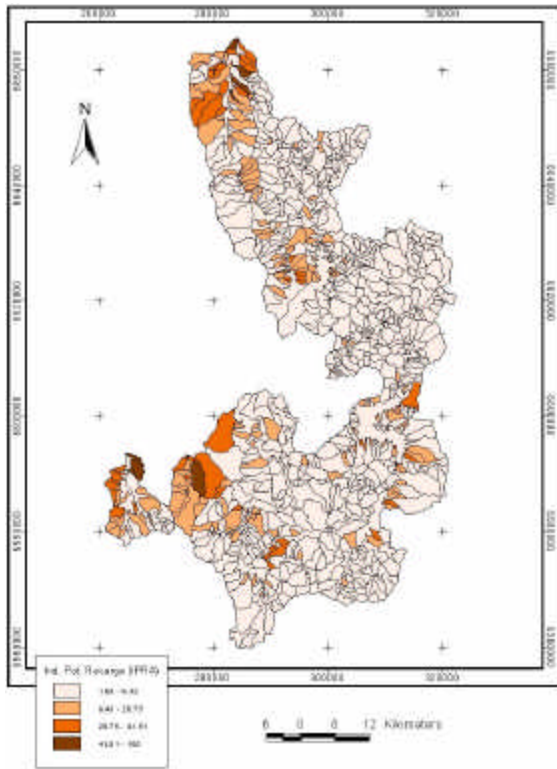


Figura 7. Índice de Recarga (IPRA)

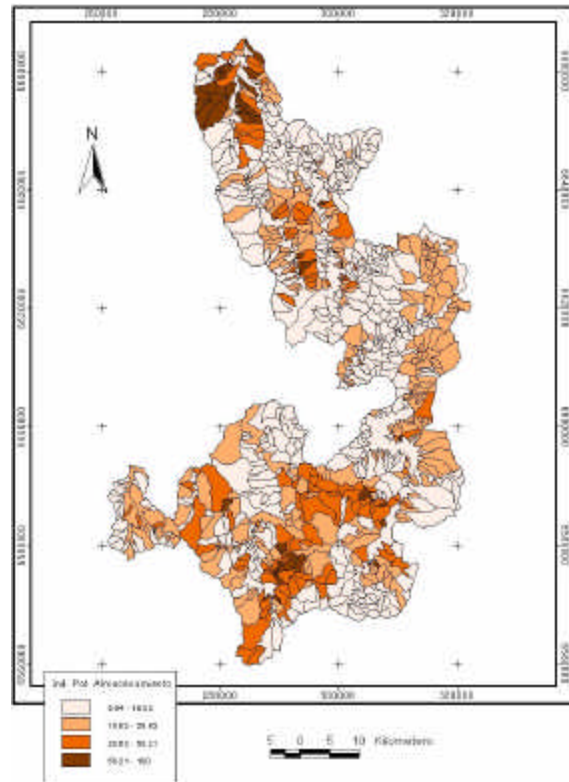


Figura 8. Índice de Almacenamiento (IPRA)

4.4 Zonas Probables de Existencia de Aguas Subterráneas (ZPA)

Finalmente, como resultado principal de la aplicación del modelo descrito se obtuvo la cartografía de ZPA para el área de estudio, clasificadas en cuatro clases de probabilidad (baja, media, alta y muy alta). En la figura 9 se presenta las ZPA del área de estudio y los límites de las Comunidades Agrícolas insertas en el área.

El número y superficie de cada clase de probabilidad para el área de estudio se presenta en la tabla 3.

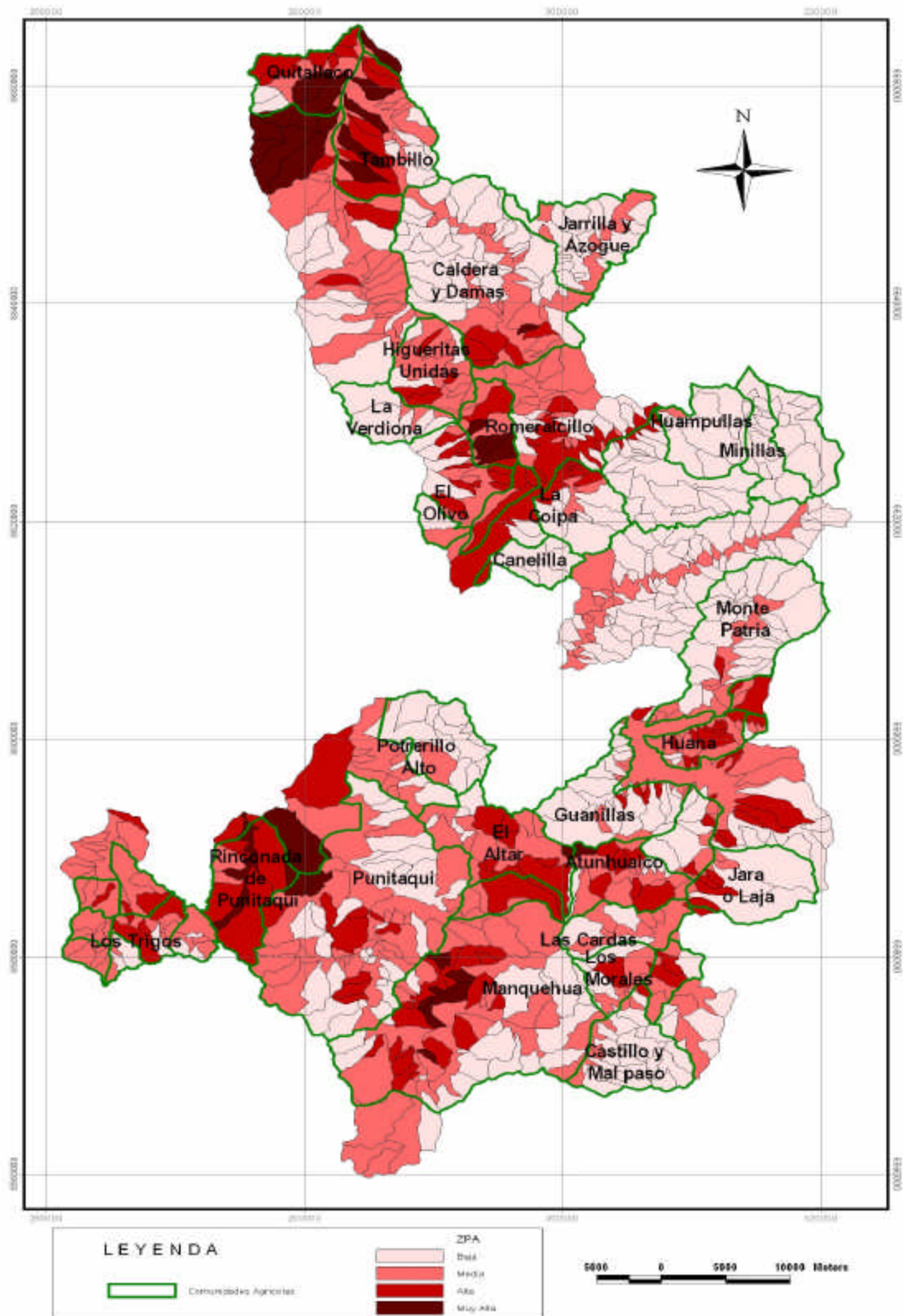


Figura 9. Zonas Probables de Agua Subterránea (ZPA) clasificadas.

Tabla 3. Número y superficie de ZPA por Clase.

Clase	N°	Superficie ha
1	379	124.839,1
2	196	95.363,2
3	139	41.241,9
4	31	12.506,9
Total	745	273.951,1

Del total de 745 ZPA del área de estudio, alrededor del 50% de ellas se clasifican como área con escasa a baja probabilidad de existencia de agua subterránea correspondiendo también a casi el 50 % del área de estudio y sólo alrededor del 5% de la superficie se clasifica en clase 4 correspondiente a las zonas de Muy alta probabilidad (Tabla 4).

Tabla 4. Porcentaje de ZPA y superficie de por Clase

Clase	Porcentaje ZPA	Porcentaje Superficie
1	50,9	45,6
2	26,3	34,8
3	18,7	15,1
4	4,2	4,6
Total	100,0	100,0

Cabe recordar, que del total de la superficie del área de estudio (273.951 ha.) las Comunidades Agrícolas insertas ocupan 192.143,3 ha.. La diferencia corresponde a propiedad privada correspondiente a 81.807.2 ha.

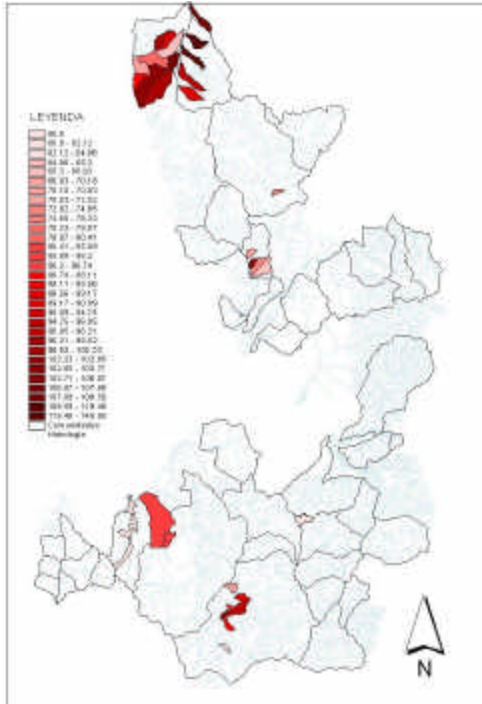
Del total de 39 Comunidades Agrícolas en el área, en sólo 8 existen ZPA con muy alta probabilidad correspondiente a alrededor de 7 mil ha. y el sector privado en esta misma clase tiene 5 mil ha. (Tabla 5).

Tabla 5. Clase 3 y 4 de ZPA y Comunidades Agrícolas a la que pertenecen

Comunidades Agrícolas	ZPA 3		ZPA 4		TOTAL 3 Y 4	
	Sup_ha	Nº	Sup_ha	Nº	Sup_ha	Nº
Tambillo	2.284,1	6	1.550,0	4	3.834,1	10
Quitallaco	1.451,1	6	1.174,2	3	2.625,3	9
Manquehua	3.782,7	16	1.150,7	8	4.933,4	24
Romeralcillo	791,1	2	894,6	4	1.685,7	6
Rinconada Punitaqui	3.961,4	5	826,8	1	4.788,2	6
Atunhuaico	1.627,5	7	281,8	1	1.909,3	8
Punitaqui	2.199,0	9	260,7	1	2.459,7	10
Caldera y Damas	1.394,0	5	94,6	1	1.488,6	6
Blas y Bulrreme	5.158,1	1			5.158,1	1
El Divisadero	2.584,2	2			2.584,2	2
El Altar	1.087,2	5			1.087,2	5
Las Damas	819,1	2			819,1	2
Huana	755,4	9			755,4	9
Higueritas Unidas	706,6	4			706,6	4
Los Trigos	699,5	2			699,5	2
Jara o Laja	648,8	4			648,8	4
Chacarillas	564,2	2			564,2	2
Los Morales	435,2	1			435,2	1
La Coipa	393,7	5			393,7	5
El Olivo	345,3	2			345,3	2
Guanillas	274,7	4			274,7	4
El Tome	184,6	2			184,6	2
Los Pozos	124,6	1			124,6	1
Monte Patria	107,2	1			107,2	1
Castillo Mal Paso	95,5	1			95,5	1
Privados	8.767,0	35	5.034,2	8	13.801,2	41
Total	41.241,8	139	12.522,4	31	52.509,4	168

4.5 Cartografía de ZPA jerarquizadas de acuerdo a la capacidad de recarga y de almacenamiento del acuífero.

Para priorizar las microcuencas al interior de cada clase de ZPA, éstas se jerarquizaron de acuerdo a la suma de los índices de recarga y de almacenamiento. (Figuras 10, 11, 12 y 13).



4.6 Cartografía de Zonas Hidrogeológicas Homogéneas (ZHH) para el área de estudio.

Se determinó para cada microcuenca del área de estudio, un índice, correspondiente al promedio ponderado por superficie, de la calidad de la microcuenca desde el punto de vista hidrogeológico para lo cual se aplicó la metodología tradicional de Zonas Hidrogeológicas Homogéneas (ZHH) determinándose 5 Zonas Hidrogeológicas Homogéneas en el área de estudio (figura 14.).

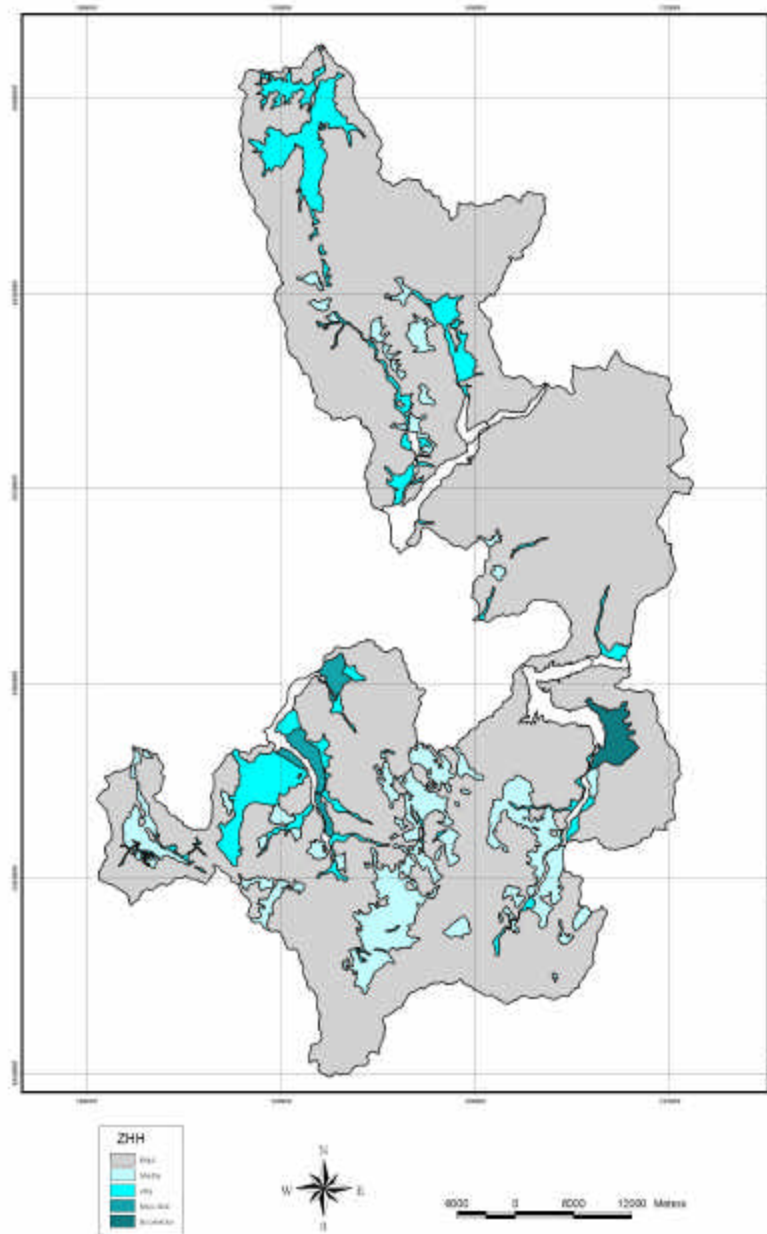


Figura 14. Zonas Hidrogeológicas Homogéneas (ZHH).

Las clases de ZHH fueron las siguientes:

- **ZHH I** Las ZPA que se localizan íntegramente al interior de esta clase tienen poca probabilidad de contener acuíferos, lo cual coincidió con el rango de ZPA asignado a estas microcuencas, todas las cuales caen dentro del rango 1. Esta zona presenta condiciones hidrogeológicas homogéneas al ser impermeables, debido a esto el agua producto de las precipitaciones se evapora o escurre libremente hacia las otras zonas hidrogeológicas homogéneas sirviendo de recarga para estas. Por otro lado, esta unidad se proyecta por debajo de las otras ZHH, por lo que constituye el basamento impermeable de los acuíferos existentes al interior del área en estudio.

- **ZHH II.** Esta zona hidrogeológica esta conformada por roca meteorizada e intensamente fracturada, cuyos afloramientos se presentan en varios sectores del área de estudio. Los cambios producidos en estas rocas, tanto por la meteorización como por la tectónica, le confieren a esta zona un potencial variable para conducir y almacenar agua subterránea, llegando a constituir acuíferos de mediana productividad en los sectores de alta permeabilidad y potencias considerables. De acuerdo a estos antecedentes, al construir un pozo en la zona hidrogeológica II con una profundidad entre 10 y 30 m, se debiera extraer un caudal entre 1 y 10 l/s.

- **ZHH III.** Esta zona hidrogeológica esta conformada por depósitos coluviales y abanicos aluviales situados, principalmente, en los alrededores de las localidades de Tambillo y Punitaqui, y en menor escala por el río Guatulame y en la quebrada del Ingenio. Estos materiales presentan permeabilidades variables, sin embargo la ocurrencia de agua subterránea en esta zona es mediana a baja, debido a disponerse en las secciones altas y medias de los valles, lo que hace que la recarga y el flujo subterráneo producido por las precipitaciones pasen por estos depósitos hacia los sectores más bajos (Zona Hidrogeológicas Homogéneas IV). Así se tiene que un pozo construido en esta zona, con una profundidad entre 40 y 60 m, debiera entregar un caudal entre 0.5 y 10 l/s.

- **ZHH IV.** Esta unidad esta compuesta por depósitos fluvioaluviales que se disponen en terrazas a lo largo del valle que conforma la Quebrada de Punitaqui, teniendo su mayor extensión y potencia al lado este de la quebrada. Con los antecedentes disponibles, es posible estimar que un pozo construido en esta zona hidrogeológica, con una profundidad entre 40 y 60 m tendría un caudal de producción entre 5 y 20 l/s.

- **ZHH V .** Esta zona, al igual que la ZHH III, esta constituida por depósitos aluviales y coluviales, ubicados en la localidad de El Palqui, en la ribera este del tranque La Paloma, conformando una unidad propia, debido a las características hidrogeológicas particulares de esta zona, la que se encuentra influenciada por este cuerpo de agua. Los pozos en este sector tienen productividades sobre 1l/s/m, por tanto, es posible estimar que un pozo construido en esta zona hidrogeológica, con una profundidad entre 40 y 60 m tendría un caudal de producción entre 20 y 60 l/s.

La delimitación de ZHH es muy importante dado que la metodología desarrollada permite priorizar **microcuencas** (ZPA) de interés de aguas subterráneas. Sin embargo, la perforación o sondaje se debe realizar al interior de estas ZPA en aquellos lugares donde el estudio de ZHH lo indica.

El procedimiento consiste en elegir las microcuencas de mayor jerarquización en las clases de ZPA 3 y 4 (alta y muy alta probabilidad), luego elegir las ZHH de mayor calidad al interior de estas, para finalmente, en base a la experiencia de un hidrogeólogo más apoyo de técnicas basadas en perfiles de exploración geofísica, determinar el punto de perforación.

4.7 Resultados de validación.

Los resultados de validación de la metodología fueron los siguientes:

- a) **Análisis entre ZPA y ZHH.** Al realizar una regresión entre las clases de ZPA y el promedio de ZHH se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,94 que indica una fuerte tendencia entre ambas variables. Cuando se establece la relación entre el índice jerárquico de ZPA de cada microcuenca con el promedio de ZHH, el coeficiente de correlación disminuye a 0,71 lo que mantiene la tendencia general. Esto valida la metodología de ZPA.
- b) **Relación de las ZPA con Pozos y Norias existentes.** Esta relación indicó que los pozos se distribuyen en su mayoría en las clases 3 y 4 mientras que, las norias se concentran en la clase 2 (tabla 6). Esto se encuentra en relación con el resultado de ZHH obtenido y con las propias clases de ZPA.

Tabla 6. Distribución de pozos y norias por clases de ZPA.

ZPA	POZOS	NORIAS	TOTAL
1	-	8	8
2	-	36	36
3	13	18	31
4	3	11	14
TOTAL	16	73	89

- c) **Análisis de focos de vegetación.** Este análisis, como indicador de presencia de agua a nivel subsuperficial, indicó que los focos de vegetación se encuentran relacionados con las microcuencas de mejor calidad de la clase 2 de ZPA, lo que corrobora la propia jerarquización de esta clase.

- d) **Pozos de Estudios.** Como resultado del proyecto quedaron tres sondajes habilitados en tubería de PVC de 4" y engravillado (figura 15).



Figura 15. Pozo de estudio en Rinconada de Punitaqui

En la Tabla 7 se presenta la localización y altitud de los pozos realizados y la Comunidad Agrícola donde se insertan.

Tabla 7. Localización de pozos de estudio

POZO	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Altitud (m)
Pozo1. Romeralcillo	6.627.959	292.773	325
Pozo 2. Rinconada de Punitaqui	6.589.982	277.276	204
Pozo 3. Manquehua	6.579.961	290.444	722

En la Tabla 8 se entregan los datos de caudal, nivel estático y nivel dinámico cuando corresponde de cada pozo además de la clase de ZPA y ZHH donde se ubica.

Tabla 8. Características de pozos de estudio

POZO	Clase de ZPA	Clase de ZHH	Profundidad (m)	Caudal L/s	Nivel Estático (m)	Nivel Dinámico (m)
Romeralcillo	4	3	72	2,0	7,28	18,5
Rinconada de Punitaqui	3	3	36	3,5	7,42	10,0
Manquehua	4	2	90	No se encontró agua		

Estos resultados validan la metodología y se reitera que la metodología zonifica áreas con mayor o menor probabilidad de encontrar agua subterránea, sin embargo la localización de los pozos al interior de ellas debe ser en aquellos sectores donde el estudio de ZHH lo indique. El área de Manquehua corresponde a rocas fracturadas por lo cual requiere un estudio hidrogeológico más detallado para realización de los sondajes (ver anexo 2 referente a ZHH).

4.8 Resultados de hidrogeología y la aplicación del MODFLOW

Se realizó un estudio hidrogeológico (anexo 2) para determinar las características de los acuíferos donde se localizaron los pozos de estudio correspondientes a los sectores de Romeralcillo y Rinconada de Punitaqui. Dado que en el tercer pozo no se encontró agua, se seleccionó un tercer sector correspondiente a Tambillo por presentar información suficiente para su caracterización. En este mismo sector se realizó el modelamiento del acuífero el que se detalla a continuación.

El modelo aplicado para la simulación del acuífero de un sector del área de estudio correspondió al denominado MODFLOW, desarrollado por el U.S. Geological Survey, el cual ha sido ampliamente aplicado y probado mundialmente. Es el modelo de aguas subterráneas que más se utiliza en la actualidad a nivel internacional.

El Modflow se aplicó en el área de Tambillo debido a que cuenta con la mayor información referente a pozos y perfiles geofísicos. El área modelada, en celdas de 200 m, cubre una superficie de 42 km². En el se insertan ZPA de las clases 3 y 4, todas ubicadas en una Zona Hidrogeológica III (figura 16).

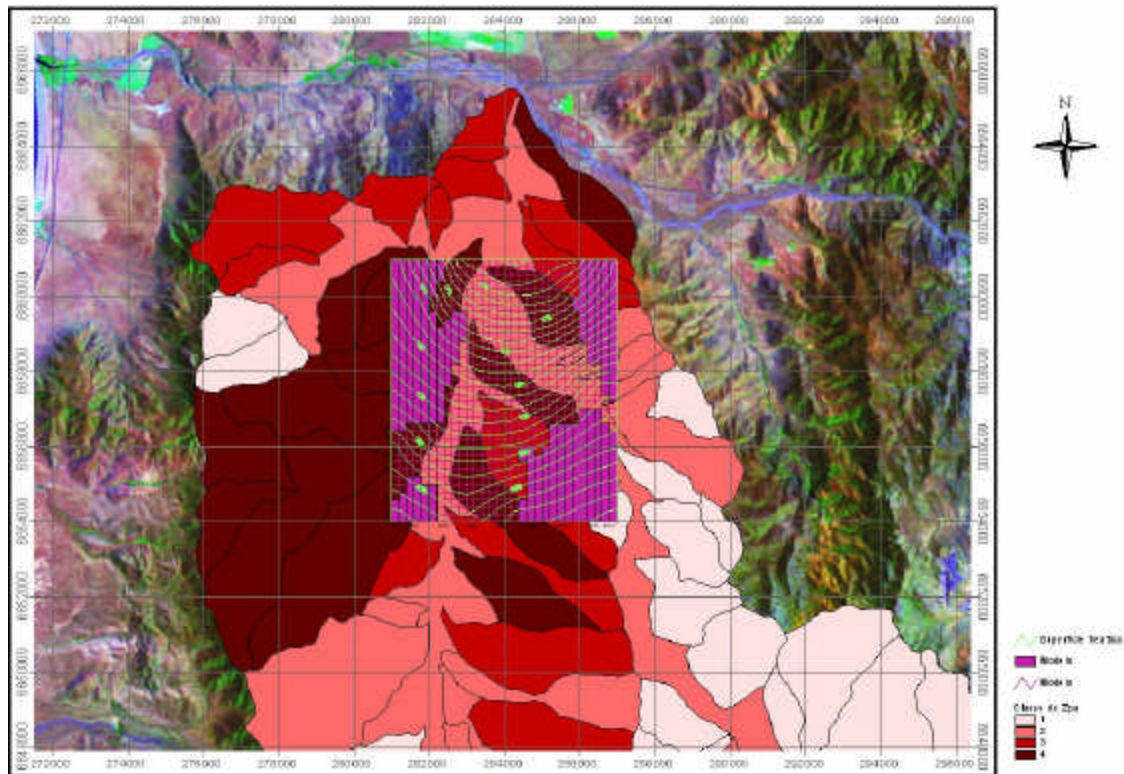


Figura 16. Área de aplicación del MODFLOW

Las curvas correspondientes a los niveles freáticos del área fluctúan entre 17 a 20 metros (figura 17).

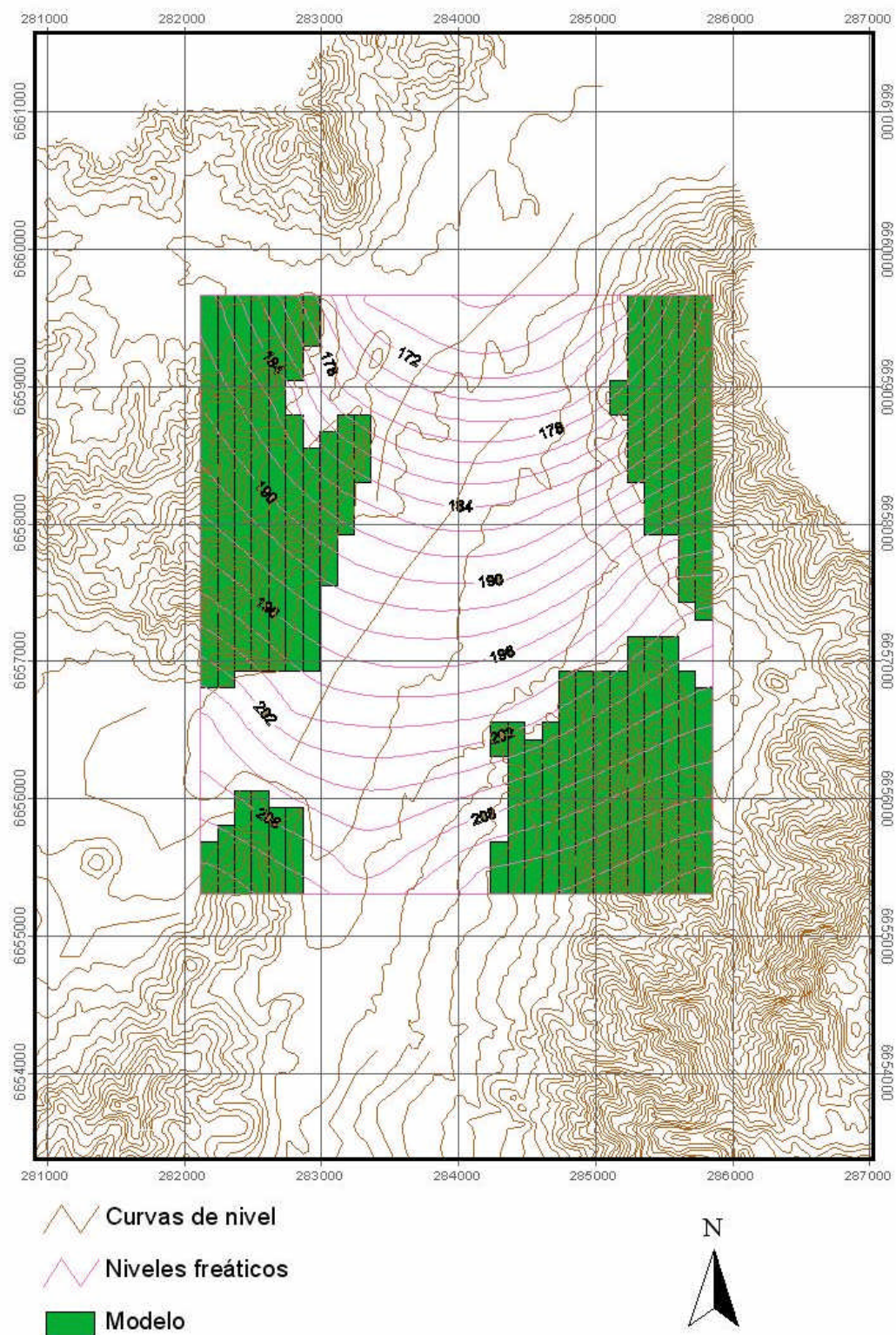


Figura 17. Niveles freáticos. Modelamiento con ModFlow

4.9 Difusión y Transferencia

Los principales logros de esta actividad fueron los siguientes:

a) Conferencia de prensa en la IV Región. Contó con la presencia de xx radioemisoras de la región, la prensa local y la presencia del Canal Nacional de Televisión (figura 18) y duró aproximadamente 45 minutos. Se realizó en un salón de la Intendencia de la IV Región en La Serena.



Figura 18. Conferencia de Prensa en La Serena

En esta conferencia participó, (de derecha a izquierda en la foto de la figura 16), el SEREMI de Agricultura de la región, Sr. Pedro Hernández; la SEREMI de Bienes Nacionales de la IV región, Srta. Daniela Donoso. Por parte de CIREN participó el Gerente de Operaciones Sr. Heriberto Pinto y la Directora del proyecto, Sra. Marión Espinosa.

b) Acto de Cierre del Proyecto. Tuvo una asistencia de 70 personas aproximadamente y participaron representantes de la Intendencia (Intendente subrogante); el senador por la región Sr. Jorge Pizarro; Gobernadores de las provincias de Elquí y Limarí; Comunidades Agrícolas; Confederaciones Campesinas; Bienes Nacionales regional y nacional; CORFO regional; INIA, INDAP provincial y regional, SAG entre otros.

c) Transferencia de resultados: Tríptico, carpetas de resultados para cada Comunidad Agrícola del área de estudio, afiches, informes a asociados. Cabe señalar que al cierre de este informe se tiene programado actividades de difusión en

la III y IV región, con el objeto de analizar la continuidad del proyecto ejecutado y se esta solicitando al FDI la autorización para utilizar un excedente financiero proveniente del presupuesto para actividades de Difusión, de acuerdo a la cláusula quinta del convenio subsidio suscrito para el desarrollo del proyecto.

Las actividades que se indican fueron solicitadas en el acto de cierre del proyecto, las que por problemas de tiempo (actividades de fines de año) no pudieron realizarse durante el mes de Diciembre.

Además de los resultados previamente descritos, cabe destacar que se realizó un Convenio con el Centro de Percepción Remota de Canadá, a través del cual ellos donaron dos imágenes de radar de Diciembre del 2001 del satélite RADARSAT. El compromiso fue entregar los resultados obtenidos de la aplicación de los datos durante el primer año de desarrollo del proyecto.

Cabe señalar además, que queda disponible en CIREN bases de datos gráficas y descriptivas que componen el Sistema de Información Geográfica del área de estudio del proyecto y que contiene información de suelos, clima, curvas de nivel cada 25 metros, red hídrica, drenaje natural, unidades hidrogeológicas, morfología, geología, litología, modelo digital del terreno (DEM), lineamientos, pozos y norias, vegetación nativa en formato vectorial.

En formato raster queda disponible 1 imagen Landsat TM de diciembre del 2001, dos imágenes de radar (RADARSAT) de la misma fecha y resultados intermedios de procesos realizados (imagen fusion de datos ópticos y de radar, mosaico de las imágenes de radar, modelo numérico del terreno (DEM), análisis de componentes principales, déficit hídrico entre otros).

5. SÍNTESIS DE ACTIVIDADES Y MÉTODOS

Dado que este informe corresponde al Final del proyecto, se presenta una revisión de lo que constituyó el proyecto a través de un resumen de sus etapas.

5.1. Etapa 1. Coordinación. Fue ejecutada durante todo el desarrollo del proyecto

En esta etapa se logró la coordinación de todas las actividades de control, coordinación y gestión del proyecto, tanto en su vinculación interna como con las entidades asociadas al proyecto. Es así, que en esta etapa se realizó las actividades de inicio del proyecto, convenios con los asociados en el proyecto, reuniones con los coordinadores en el proyecto de las entidades asociadas, reuniones internas del equipo técnico del proyecto, términos de referencia de los contratos, reuniones con las Comunidades Agrícolas y coordinación de las actividades de cierre del proyecto.

5.2. Etapa 2. Definición del Método de Exploración. Se ejecutó desde el inicio del proyecto hasta Mayo del 2002 y estuvo orientada a definir la metodología a desarrollar por el proyecto.

Esta etapa incluyó la recopilación y evaluación de información tanto cartográfica del área de estudio como también información de estudios realizados tanto en el país como en el extranjero. Producto de ello, se realizó una visita a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en México, quienes han desarrollado algunos estudios en zonas áridas integrando datos satelitales y SIG.

Por otra parte, en esta etapa se realizó la capacitación del equipo técnico en manejo de datos satelitales, SIG y modelamiento; en softwares específicos como el MOD Flow junto con la adquisición de equipos computacionales de alta capacidad y velocidad de procesamiento que permitieran el manejo de datos satelitales.

En esta etapa, a pesar de estar programado para la etapa siguiente, se realizó la selección y adquisición de la data satelital. De acuerdo a ello, se adquirió una imagen óptica Landsat del sensor multiespectral (7 bandas) de Diciembre del 2001. Se logró a través de un acuerdo entre CIREN y el Centro Canadiense de Percepción Remota, la donación de dos imágenes de radar (RADARSAT) para una fecha cercana a la de la imagen óptica (Diciembre 2001).

Como resultado de esta etapa se logró definir la metodología y algoritmos que se utilizó en el desarrollo del modelo de exploración de aguas subterráneas. Posteriormente se realizaron ajustes a este modelo, una vez que se analizaron los resultados preliminares.

A continuación se presenta la metodología para la obtención de zonas probables de existencia de aguas subterráneas (ZPA) definida en esta etapa.

5.2.1 Metodología General para la obtención de las ZPA

Las consideraciones generales que permitieron la definición metodológica fueron las siguientes:

- i) Los indicadores de ocurrencia de aguas subterráneas están relacionados con el ciclo hidrológico y este con la distribución de la lluvia, uso y tipo de suelo, litología, estructuras geológicas, altitud, pendiente y red de drenajes del área.
- ii) Los datos de satélite proveen información para el estudio de elementos y características de la superficie como lineamientos, uso del suelo, red hídrica, vegetación, geomorfología, litología, etc.
- iii) La evaluación integrada de mapas temáticos utilizando un modelo basado en SIG es el método más apropiado para predicción de zonas potenciales de aguas subterráneas (Chevrel y Coetzee, 2000).

Las microcuencas del área de estudio constituyeron la base de análisis para la determinación de las Zonas Probables de Existencia de Agua Subterránea (ZPA).

El esquema metodológico utilizado para el desarrollo del proyecto comprendió básicamente dos fases, que se combinaron con actividades de terreno, como se muestra en la figura 19.

La primera fase corresponde a la obtención de las ZPA, mientras que la segunda corresponde al desarrollo de la metodología tradicional que se utiliza para determinar las zonas hidrogeológicas homogéneas, basada en datos geológicos de escala media, en perfiles geofísicos y en la determinación y caracterización de pozos modales. El desarrollo de esta segunda fase tiene como finalidad validar el modelo de exploración.

De acuerdo al diagrama de la figura 19, la primera fase se define a partir del procesamiento de datos satelitales ópticos (Landsat TM+) y de radar (Radarsat) en conjunto con datos auxiliares de topografía (curvas de nivel cada 25 metros), clima y red de drenaje, de donde se obtienen los datos para la construcción de los Índices litológicos, de Lineamientos, de Infiltración Superficial y el Índice Climático.

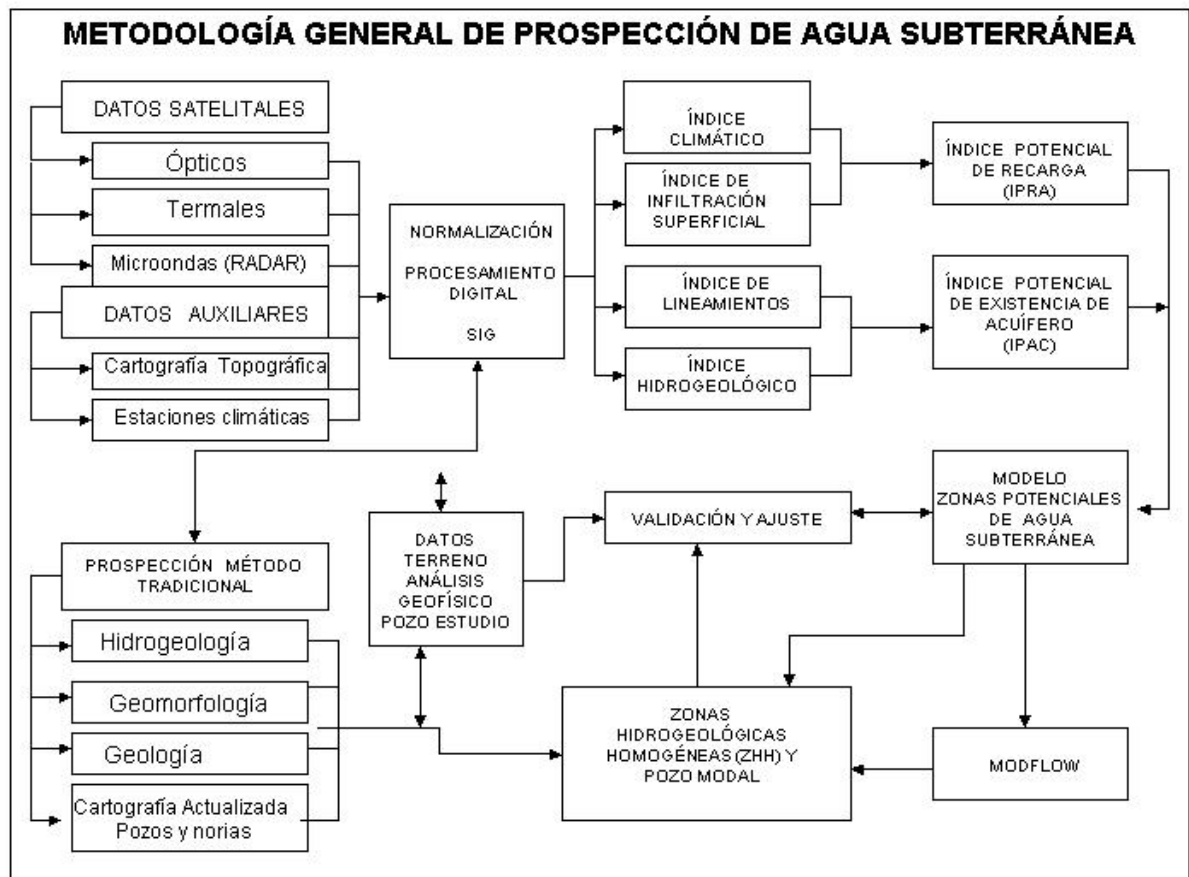


Figura 19. Metodología general

Las zonas probables de existencia de aguas subterráneas (ZPA) identificadas, delimitadas y caracterizadas espacial y descriptivamente en el ámbito geográfico de los interfluvios de los valles de los ríos Elquí, Limarí y Choapa, a través del estudio de las variables antes indicadas, se consolidan, a su vez, en subíndices denominados de lineamientos estructurales, de infiltración superficial, climático e hidrogeológico, obteniéndose como resultado los índices de síntesis llamados índice potencial de recarga (IPRA) e índice potencial de acuífero (IPEA), para cada microcuenca. El primero se deriva del análisis e integración de los factores de precipitación, evapotranspiración, vegetación, red hidrológica, topografía y formas de microcuencas. El segundo índice se obtiene de los factores: lineamientos geológicos, morfología, litología y pendiente. La mayor parte de estos factores se derivan de los datos satelitales los que fueron integrados en un SIG.

Finalmente, los índices IPRA e IPEA se analizan mediante un modelo de tabulación cruzada, de donde se obtiene la priorización de las microcuencas, según su potencial de probabilidad de existencia de acuífero (ZPA), en 4 clases: 1 Baja; 2 Media; 3 Alta y 4 Muy Alta.

La consideración de la suma de ambos índices permite la jerarquización de las ZPA al interior de cada clase.

Finalmente, se seleccionaron tres ZPA y se determinaron los puntos de perforación, con la finalidad de verificar la existencia de agua en terreno.

Posteriormente se trabajó con la metodología tradicional de determinación de Zonas Hidrogeológicas Homogéneas (ZHH), en base a las cuales se validó la jerarquización de las ZPA.

5.3. Etapa 3. Desarrollo del Modelo exploratorio aguas subterráneas. Se ejecutó desde Abril del 2002 hasta Abril del 2003. Los primeros meses de esta etapa estuvo orientada a la compilación de la información del área de estudio.

Se utilizó como base el estudio de Comunidades Agrícolas de la IV región realizado por IREN en 1978 a escala 1:250.000, además de información que disponía CIREN de otros estudios a esta misma escala. Toda la información recopilada fue ingresada al SIG y se llevó a escala 1:50.000 utilizando distintas composiciones de bandas espectrales, análisis de componentes principales y otros procesos para la obtención de las distintas cartas temáticas y también con mediciones radiométricas y chequeos de terreno.

A partir de los datos topográficos (curvas de nivel cada 25 m) se construyó el Modelo Digital de Elevación (DEM) y a partir de este se extrajo la red natural de drenaje, la exposición y pendiente del área de estudio. Con estos datos se delimitan las unidades de análisis, obteniéndose un total de 745 microcuencas para el área de estudio.

Los lineamientos estructurales del área de estudio fueron extraídos directamente a partir del procesamiento de datos satelitales de radar y ópticos. Por su parte, los datos climáticos fueron modelados para su espacialización a toda el área de estudio. Esto se realizó a partir de una grilla de puntos de precipitación y evapotranspiración cada 10 km aproximadamente. Los datos de temperatura fueron obtenidos de las bandas termales del Landsat.

De acuerdo al modelo definido en la etapa anterior, una vez obtenidos los datos bases se construyeron los índices climáticos, de lineamientos, de infiltración superficial y el litológico para cada microcuenca, a partir de los cuales se derivó los índices de recarga (IPRA) y almacenamiento (IPEA) para cada unidad de análisis. Estos dos últimos índices fueron clasificados en 4 clases (1. Baja; 2. Media; 3. Alta y; 4. Muy Alta) los que a través de una relación matricial originaron las Zonas Probables de Existencia de Agua (ZPA) clasificadas en las mismas cuatro clases anteriores.

Cabe señalar, que en el modelo preliminar que se aplicó, las ZPA eran obtenidas a través de la suma de la recarga y el almacenamiento. Sin embargo, luego de la

verificación en terreno se concluyó que era necesario ajustar los datos litológicos y geológicos a una escala de mayor detalle e incorporar la variable de pendiente al índice litológico. Por otra parte, se concluyó que la relación entre recarga y almacenamiento era una relación matricial de la forma presentada en la Tabla 2 del punto 5.2.1.

5.4. Etapa 4. Determinación de ZHH y Pozo Modal. Esta etapa estuvo orientada a validar la metodología de ZPA a través del método tradicional de exploración. Se inició con la recopilación de la información de pozos y norias del área de estudio. En aquellas áreas con información de pozos y/o norias insuficiente se realizó exploración geofísica mediante la aplicación de los métodos de Transiente Electromagnética TEM, en 18 líneas, y Ohm-mapper, con 6 perfiles (ver anexo 2).

A continuación en los puntos 5.4.1 y 5.4.2 se desarrolla la metodología de obtención de las ZHH y de validación del modelo.

5.4.1 Metodología General de Zonas Hidrológicas Homogéneas (ZHH)

Una Zona Hidrogeológica Homogénea (ZHH) es un conjunto de áreas cuyas características hidrogeológicas son muy similares.

Las ZHH de la totalidad del área de estudio fueron delimitadas de acuerdo al siguiente esquema metodológico (Figura 20).

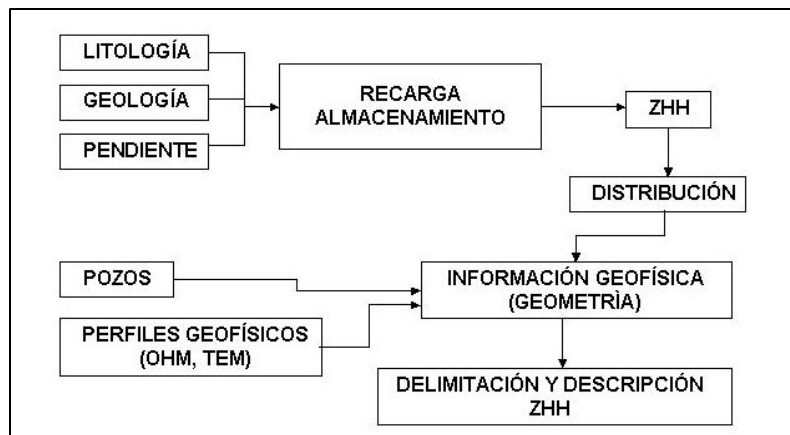


Figura 20. Metodología de ZHH

De acuerdo al diagrama metodológico de la figura 20, para la determinación de las zonas (ZHH) se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

i). Litología, geología y pendiente.

Estos constituyen los factores de mayor importancia para reconocer la existencia y características de los acuíferos en la zona de los interfluvios, debido a que a estos parámetros se asocian a la granulometría, la permeabilidad, la porosidad,

coeficientes de almacenamiento y transmisividad, que son características esenciales para la definición de acuíferos.

ii) Distribución

Considerando la distribución espacial, se tiene que las zonas hidrogeológicas homogéneas agrupan una serie de depósitos que se distribuyen a lo largo del sector de los interfluvios. Estos depósitos contienen características litológicas similares debido a que fueron formados en un mismo ambiente y han sufrido procesos geológicos similares.

iii) Geometría (Interpretación geofísica)

Cuando se habla de geometría, se refiere a determinar los distintos espesores de las capas que conforman la unidad, la profundidad del basamento o capas impermeables, espesor y profundidad del estrato saturado. Al saber la geometría se tiene una idea acerca de la potencialidad del recurso en esa área.

Esta información se obtuvo mediante la recopilación y análisis de la estratigrafía de los pozos existentes en las distintas áreas o mediante perfiles geofísicos que se realizaron para el estudio.

iv) Productividad de los pozos

Para caracterizar las distintas zonas hidrogeológicas homogéneas fue necesario conocer la capacidad de explotación de agua subterránea de los distintos acuíferos. Para esto se contó con información sobre los caudales y de niveles estático y dinámico de pozos distribuidos a lo largo de todo el sector de los interfluvios.

Con la información de los pozos se calculó el caudal específico, el cual resulta ser el mejor parámetro de comparación ya que indica la cantidad de litros por segundo que entrega un pozo por metro de agua que se deprime a causa del bombeo. Este parámetro es independiente de la profundidad que tiene el pozo, por lo que se pueden comparar pozos situados en diferentes lugares.

En cada unidad hidrogeológica se analizaron los pozos que contienen la información necesaria para el cálculo de este parámetro como son el caudal y los niveles estático y dinámico.

5.4.2 Metodología de Validación

Determinadas las ZHH para la totalidad del área de estudio, el siguiente paso fue validar las ZPA. Para ello se determinó el siguiente procedimiento:

1. Analizar la tendencia general de la relación entre las ZPA y las ZHH.

2. Análisis de la relación entre la jerarquización de las ZPA y el valor promedio de ZHH por microcuenca.
3. Análisis de la distribución de pozos en relación a las ZPA.
4. Análisis de la distribución de focos de vegetación en relación con las ZPA de menor probabilidad: baja (1) y media (2).
5. Análisis de los puntos de perforación en terreno.

Los puntos 1 y 2 se desarrollaron determinando la relación existente entre las cuatro clases de ZPA con el valor promedio de ZHH correspondiente. De igual forma se estableció la relación entre la jerarquización de las ZPA y el valor promedio de ZHH ponderado por superficie.

El siguiente punto consideró un análisis cuantitativo de la distribución de pozos obtenido por superposición de los datos en el SIG el cual permitió verificar la concordancia tanto de las ZHH como de las ZPA.

Por otro lado, la determinación de focos de vegetación, los que normalmente se encuentran, según comprobaciones de terreno, asociados a fuentes de agua, tanto de pequeñas vertientes como de norias, fueron relacionados con la jerarquización de ZPA de las clases de probabilidad media y baja. Para ello se procedió a determinar el número de focos por microcuencas y relacionarlos con el valor de jerarquización.

Finalmente, se realizó la verificación de existencia de agua en terreno, mediante perforaciones de estudio, determinando tres puntos (cantidad determinada por los recursos económicos presupuestados en el proyecto para dicha actividad) en forma aleatoria entre las ZPA de mejores probabilidades (Alta y Muy Alta). La localización en terreno de la perforación se hizo en base a la ZHH de mejor calidad en la ZPA y la experiencia de los profesionales hidrogeólogos del proyecto.

De acuerdo al esquema metodológico, se aplicó el software de modelamiento de acuífero MODFLOW a un sector del área de estudio, específicamente el sector de Tambillo dado que de acuerdo a los resultados corresponde a un sector donde se concentra ZPA de las clases 3 y 4, además que se contaba con información de pozos, norias y perfiles geofísicos.

Se realizó además un estudio de las características hidrogeológicas, en base a los antecedentes de las perforaciones y pruebas de bombeo realizadas (Anexo 2).

5.5. Etapa 5. Resultados y transferencia. Esta etapa se programó con una duración de dos meses al término del proyecto. Sin embargo, esta etapa comenzó antes, dado que despertó inquietudes en la región que motivaron la realización de varias charlas tanto con Comunidades Agrícolas y otros organismos interesados, antes de la fecha programada.

En esta etapa se realizó el análisis de los resultados obtenidos, la obtención de la cartografía final, la sistematización de las bases de datos generadas y la elaboración del presente informe.

Parte de esta etapa correspondió también a la difusión y transferencia de los resultados del proyecto.

Las actividades de difusión realizadas fueron la participación como expositores en el Comité de Secano de la IV región, charlas de los avances del proyecto a las Comunidades Agrícolas del área de estudio, participación en el Congreso de Cuencas Hidrográficas, participación a través de afiches en la Expo- rural y FIDAE, participación con un stand en el Seminario Chileno-Israelí (afiches y artículos), artículos en prensa, realización de conferencia de prensa al término del proyecto y acto de cierre del proyecto. Estas dos últimas se realizaron en la Intendencia de La Serena.

Para el acto de cierre del proyecto se preparó una cartilla en forma de tríptico, tamaño 60 x 30 cms. el cual contiene un resumen del proyecto (área de estudio, objetivos, metodología y resultados obtenidos), carpetas con antecedentes técnicos para cada Comunidad, además de material de promoción.

6. CONCLUSIONES

La metodología definida por el estudio resultó ser válida, de acuerdo a las ZHH, a la distribución de pozos y norias existentes y a los perfiles geofísicos realizados en terreno. Sin embargo, en zonas con predominancia de rocas fracturadas requieren de un análisis de ZHH y de la construcción de perfiles con técnicas tradicionales, de mayor detalle para la localización de pozos.

Con todo, se concluye que:

- a) La determinación de ZPA y la respectiva jerarquización, de acuerdo a la metodología definida, cuya base se encuentra en el análisis e integración de datos satelitales y en la consideración de microcuencas como unidad de análisis, resulta ser adecuada para determinar las zonas con mayor probabilidad de existencia de agua subterránea en regiones donde el régimen de recarga es pluvial.
- b) Los datos satelitales del sensor TM del LANDSAT, incluyendo las bandas termal y, los datos de radar, entregan datos imprescindibles para determinar las ZPA, de igual forma contar con datos sistemáticos de precipitación resultan ser relevantes para determinar el potencial de recarga de cada microcuenca, la data termal y la generación de Modelos Numéricos de Terreno (MNT) son la base para lograr la espacialización, tanto de la variable temperatura como la propia precipitación.
- c) De igual forma, la data de microrondas (radar) permite determinar con claridad las estructuras lineales del territorio y por consiguiente los lineamientos geológicos, contribuyendo y permitiendo construir un indicador apropiado de almacenamiento.
- d) La interpretación de las composiciones multiespectrales con fines de diferenciación geológica (RGB,741) y la propia fusión entre radar y LANDSAT constituyeron la base para el levantamiento de la geología, la litología y la geomorfología del área de estudio, variable relevante en el índice de almacenamiento.
- e) Las zonas con predominancia de rocas fracturadas requieren de un análisis de ZHH y de la construcción de perfiles con técnicas tradicionales, de mayor detalle.
- f) La metodología definida por el estudio resultó ser válida, de acuerdo a las ZHH, a la distribución de pozos y norias existentes y a los perfiles geofísicos realizados en terreno.

En resumen, se concluye que la metodología desarrollada, permite apoyar la prospección de agua subterránea en cuencas de recarga pluvial y aplicando las

debidas adaptaciones, puede ser extrapolada a zonas con características similares al área de estudio.

Sobre la información generada en el área de estudio, se debe considerar ésta de carácter estratégico, por el desarrollo o impacto que pueda tener sobre las comunidades agrícolas, por cuanto puede llegar a tener los siguientes efectos:

- a) Valorización de las propiedades.
- b) Determinar formas de manejo territorial, a través de las decisiones que puedan tomar las asambleas de las propias comunidades.
- c) Presión de las comunidades y/o por agentes externos por prospectar agua en las zonas de mayor probabilidad (ZPA 3 y 4).
- d) Posibles cambios de uso del suelo.
- e) Posible manejo inapropiado de inmobiliarias.
- f) Crear rivalidades e incompresiones entre los comuneros y entre comunidades, toda vez que el estudio no cubrió la totalidad de la superficie de las comunidades.
- g) Permitir a los organismos públicos focalizar los recursos y orientar la planificación del territorio.

7. VIGENCIA DE LOS SUPUESTOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

El proyecto se plantea como meta reemplazar, a lo menos en un 50 %, los métodos tradicionales de exploración de aguas subterráneas por las técnicas y metodologías que se obtenga como resultado de este estudio, considerando que la adopción de la tecnología se realizará en un plazo de 6 años, logrando en este plazo que los Comuneros mejoren sus ingresos por el cambio de una agricultura de secano a una de riego.

La evaluación económica tiene como base los siguientes supuestos:

- Que la metodología que se propone reduce en un 50% el número de puntos de prospección por unidad de superficie que con los métodos geofísicos tradicionales.
- Que en el país se construyen 224 pozos al año (de acuerdo a las cifras del MOP de 1988), lo que implica un total de 11.200 puntos de sondaje por los métodos geofísicos de campo.
- Que actualmente para la ubicación de un pozo se requiere como mínimo de 50 puntos de prospección para un área de 3 Km² y el método propuesto, si resulta, requerirá solo de 25 puntos de prospección para la misma superficie.
- La evaluación se realizará sólo con el 14 % de los pozos que se construyen anualmente, 30 pozos, que significa realizar 1.500 puntos de prospección con el método geofísico tradicional (Sondaje Eléctrico Vertical SEV). Se considera una cifra razonable si se piensa en mejorar la calidad de vida de las comunidades de la región.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la validación a través de la realización de sondajes de estudio y pozos existentes se pudo concluir que la metodología desarrollada permite zonificar áreas de interés en términos de su probabilidad de existencia de agua subterránea. Es así, que del total del área de estudio alrededor de un 20% se clasifica con alta y muy alta probabilidad. Este sólo hecho valida el supuesto de disminuir costos de prospección al disminuir el área total y poder focalizar el área donde realizar los sondajes.

Por otra parte, el contar con un estudio hidrogeológico al interior de las ZPA permite con mayor certeza la localización de la perforación. Es así, que de los tres sondajes realizados dos de ellos tuvieron resultados positivos.

En resumen, siguen vigentes los supuestos que sustentaron el desarrollo del proyecto.