



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS  
MINISTERIO DE AGRICULTURA

# CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA Y DEL USO DE SUELO DEL SECANO DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS



ISSN 0717 - 4829.

EDITORES  
HAMIL URIBE CIFUENTES  
ALEJANDRA CATALÁN FARFÁN

BOLETIN INIA - N° 320

El presente Boletín entrega los principales resultados obtenidos en el marco del Proyecto FIC "Programa de Desarrollo Productivo para el Secano de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins", realizado entre los años 2011 al 2015, con el apoyo financiero del Gobierno Regional de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

Editores:

Hamil Uribe C. Ingeniero Civil Agrícola. MgS. Dr. INIA - Quilamapu.  
Alejandra Catalán F. Encargada de Comunicaciones. INIA - Rayentué.

Director Responsable:

Nilo Covacevich C.  
Ingeniero Agrónomo. Ph. D.  
Director Regional INIA - Rayentué.

Boletín INIA N° 320

Cita bibliográfica correcta:

Uribe H y Catalán A. (Eds.). 2016. "Caracterización hidroclimatológica y del uso de suelo del secano de la Región de O'Higgins". Boletín INIA N° 320, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Rayentué. Rengo, Chile 110 p.

2016 Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Centro Regional de Investigación Rayentué.

Av. Salamanca s/n, Km 105 ruta 5 sur. Sector los Choapinos. Rengo.  
Teléfono (72 - 2521 686).

ISSN 0717 - 4829.

Permitida su reproducción total o parcial citando la fuente y los autores.

Corrección de textos: Alejandra Catalán Farfán

Diseño y Diagramación: Trama Impresores S.A.

Cantidad de ejemplares: 300

## AGRADECIMIENTOS

Los editores agradecen al Gobierno Regional de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, el financiamiento de iniciativas que contribuyen al desarrollo productivo sustentable de la Región. Los logros fueron posibles gracias a la participación y apoyo de agricultores, profesionales y técnicos de los programas del INDAP y Municipios, al mismo tiempo que otros organismos del Ministerio de Agricultura como la CONAF y el SAG. También, se agradece a los coejecutores del Programa: CIREN, Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile y Oregon State University.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

- 5 CAPÍTULO 1  
TOPOCLIMATOLOGÍA DEL SECANO  
DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS  
Dr. Luis Morales S.
- 29 CAPÍTULO 2  
GENERADOR CLIMÁTICO  
Dr. Luis Morales S.
- 49 CAPÍTULO 3  
CLASIFICACIÓN DE USO DE SUELOS DEL SECANO  
DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS  
Marión Espinosa T.
- 89 CAPÍTULO 4  
HIDROLOGÍA DEL SECANO  
DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS  
Hamil Uribe C.
- 105 CAPÍTULO 5  
BALANCES HÍDRICOS EN  
CUENCAS PEQUEÑAS  
Hamil Uribe C.

# Capítulo 1

## TOPOCLIMATOLOGÍA DEL SECANO DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS

### **Autor:**

Dr. Luis Morales S.  
Profesor  
Depto. Ciencias Ambientales y Rec.  
Naturales Renovables  
Facultad de Ciencias Agrónomas  
Universidad de Chile



## 1.1 CLIMATOLOGIA DEL SECANO

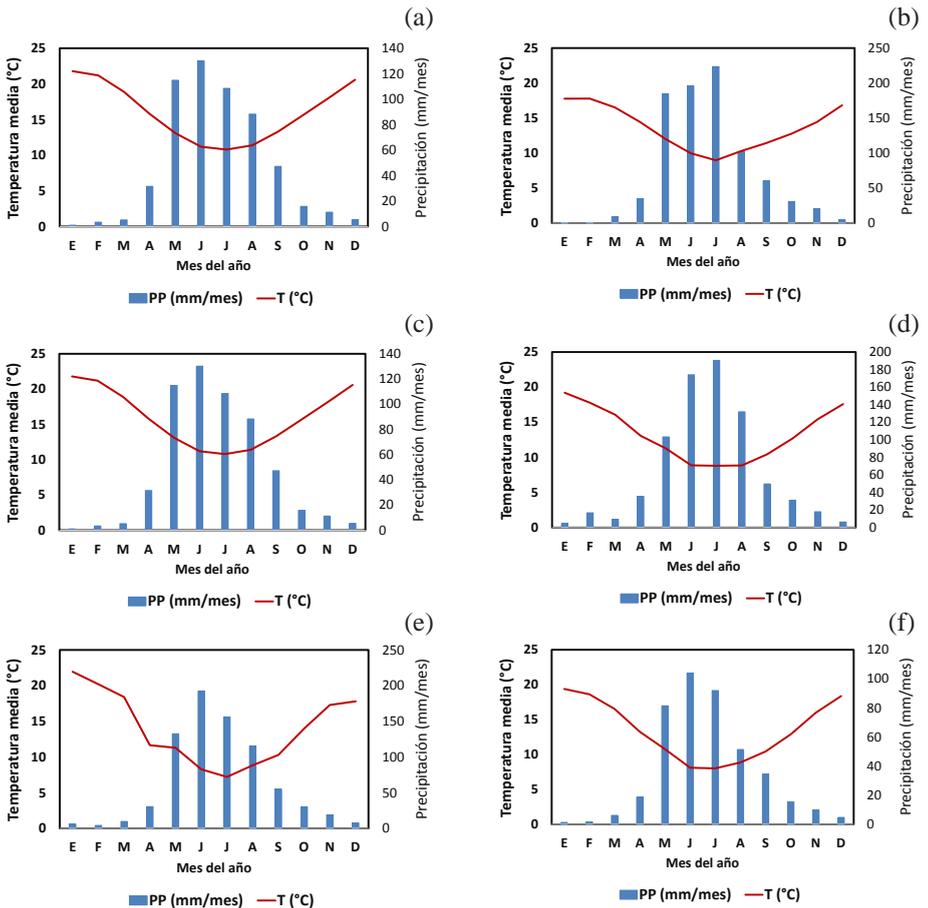
En los últimos años ha adquirido un interés relevante la elaboración de políticas públicas que permitan generar un desarrollo económico y social, asociado fundamentalmente a incrementar la capacidad competitiva a nivel regional y/o territorial. Esta se ha basado en el conocimiento científico que se ha generado producto de múltiples iniciativas y la financiación de proyectos aplicados a la solución de problemas regionales, entre ellos los asociados con la agricultura. Es conocido por todos el esfuerzo que han realizado los diferentes gobiernos para apoyar la investigación en riesgos climáticos y cambio climático, con el objetivo de determinar los impactos que estos provocan, pero además usar este conocimiento para ayudar en adaptar la agricultura a los tiempos que vienen. Es conocido que la agricultura depende fuertemente de las condiciones climatológicas del territorio donde se encuentra, principalmente porque condiciona los cultivos que allí se pueden desarrollar. Por lo tanto, el conocimiento del clima de una localidad permitiría conocer los potenciales reales que ésta posee y así contribuir a una planificación territorial efectiva. El objetivo de este capítulo es conocer el clima del secano de la Región de O'Higgins y así acercarnos a las potencialidades y riesgos que éste nos ofrece.

## 1.2 ANTECEDENTES CLIMÁTICOS Y AGROCLIMÁTICOS

El clima de una localidad se encuentra condicionado por el comportamiento de las variables meteorológicas de precipitación, humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y presión atmosférica, como variables fundamentales denominadas elementos del clima. Sin embargo existen características y condiciones locales que pueden modificar estos elementos, que son los llamados factores del clima. Entre ellos podemos citar la latitud, la distancia a la costa, Anticiclón del Pacífico, corrientes oceánicas (corriente de Humboldt), distancia a la Cordillera de los Andes, la altitud, exposición y pendiente del terreno, entre otras.

Para definir el clima de un lugar existen varios métodos, fundamentalmente basados en las precipitaciones y temperaturas como valores medios mensuales históricos. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda que para conocer el clima de un lugar es necesario contar con 30 años de datos. Vladímir Koeppen propuso una clasificación climática basada en las variaciones de temperatura y humedad como las medias de los meses extremos (cálido y frío). Este método sigue unas reglas bien definidas para asignar uno de los tipos de clima, subgrupos y subdivisiones, los que finalmente conforman un código que asigna de forma única un clima a una localidad. En base a este concepto, el clima corresponde a zonas homogéneas por temperatura y precipitación, la cual territorialmente se encuentra definida en forma única para un período de tiempo dado.

Desde el punto de vista anterior, la Región del Libertador Bernardo O'Higgins posee un Clima "Templado Cálido con Lluvias Invernales", o también llamado Mediterráneo, sin embargo la fisiografía genera tres tipologías al interior de la región, asociada a la zona costera, valle central y Cordillera de Los Andes. Según varios autores, esta región presenta tres franjas climáticas en dirección mar-cordillera (Oeste-Este), configurándose tres tipologías, sin embargo en el sector del secano solamente se observan dos tipologías, las cuales son (a) Clima templado cálido con estación seca prolongada y gran nubosidad y (b) Clima templado cálido con lluvias Invernales y estación seca prolongada (Dirección Meteorológica de Chile). La Figura 1 muestra los diagramas ombrotérmicos de varias localidades en un transecto oeste-este en la región.

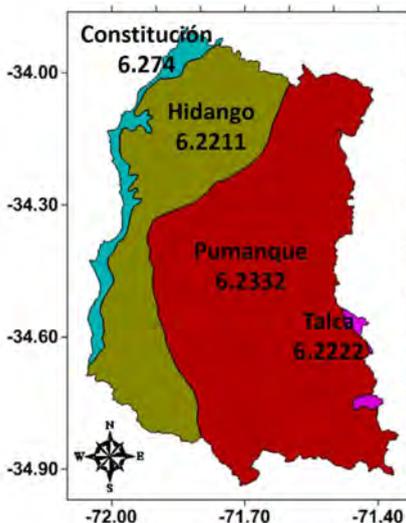


**Figura 1.** Diagramas ombrotérmicos para las localidades de (a) Pichilemu, (b) Hidango, (c) Pumanque, (d) Santa Cruz, (e) San Fernando y (f) Rancagua.

**a.- Clima templado cálido con estación seca prolongada (7 a 8 meses) y gran nubosidad (Csb<sub>n</sub>):** Este clima se encuentra asociado fundamentalmente al sector costero regional, cuyo límite se puede demarcar entre las planicies litorales y la ladera occidental de la cordillera de la Costa. Sus características son la concentración invernal de las precipitaciones (Aproximadamente el 80%) y una gran nubosidad modelada por su cercanía al Océano Pacífico, en especial por el efecto de la corriente de Humboldt. Su precipitación es de origen frontal, varía entre los 500 mm anuales en el norte y del orden de los 800 mm en el sur, concentrándose entre los meses de mayo a agosto. En relación a su temperatura, esta se ve moderada por la nubosidad, por lo que su amplitud térmica diaria y anual es moderada, tomado un valor medio de 7 °C. Se observan valores medios para el mes cálido entre los 17 y 22 °C, en cambio para el mes más frío del orden de los 9.7°C. Las diferencias promedio de temperaturas entre el mes más cálido y el más frío son del orden de 8 °C en la costa, las cuales aumentan hacia el interior.

**b.- Clima templado cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada (Csb<sub>1</sub>):** Este tipo de clima caracteriza fundamentalmente la zona del valle longitudinal o depresión intermedia. En esta área se observan veranos cálidos y secos e inviernos lluviosos, frescos y húmedos. La precipitación media anual aumenta de norte a sur, variando desde los 450 mm en el norte hasta los 900 mm hacia el sur, concentrándose preferentemente en invierno. La cordillera de la costa limita la influencia costera, observándose menor nubosidad que en la costa. Se observan valores medios para el mes cálido entre los 18 y 22 °C, en cambio para el mes más frío del orden de los 9.6°C. La temperatura registra una diferencia entre el mes más cálido y el más frío que varía entre los 10 y 13°C.

El concepto de agroclima lo podemos asociar con el concepto de clima, descrito anteriormente, con la diferencia fundamental en el número de variables a utilizar para definirlo espacialmente. La información básica se basa también en información proveniente de estaciones meteorológicas, sin embargo a estas se suman otras variables derivadas de interés agronómico, como días grado y horas de frío. En la literatura encontramos muchos métodos de zonificación agroclimática, incluso algunos aplicados en Chile. Para describir en forma genérica el agroclima del secano de la Región de O'Higgins, haremos uso del Mapa Agroclimático de Chile (Novoa et al., 1989). Esta cartografía fue desarrollada basándose en el método propuesto por Papadakis (1970), por ser la que incluía factores esenciales para el desarrollo de los cultivos, como la severidad estival e invernal. Posteriormente se realizaron análisis estadísticos y espaciales de los datos climatológicos y se obtuvo una cartografía básica que caracteriza agroclimáticamente el territorio nacional. La Figura 2 muestra los agroclimas del Secano de la Región de O'Higgins: Constitución, Hidango, Pumanque y Talca, los cuales se describen a continuación basados en los antecedentes proporcionados por Novoa et al. (1989) y otras fuentes más actuales (Santibáñez y Uribe, 1993; Del Pozo y Del Canto, 1999; Uribe et al., 2012).



**Figura 2.** Agroclimas definidos por Novoa et al. (1989) para la zona del Secano de la Región de O'Higgins.

**1.- Constitución (6.274):** Este agroclima se encuentra ubicado en la franja costera de la Región, pero su ancho es variable en el sentido norte-sur. La precipitación anual es del orden de los 897 mm siendo el mes más lluvioso junio, con una humedad relativa media anual del orden del 73%. La evapotranspiración anual es de 1.134 mm, con un valor promedio para el mes más cálido (enero) de 6,2 mm/día, en cambio en el mes más frío (julio) es del orden de 1 mm/día. La temperatura media anual es del orden de los 14°C, con una temperatura máxima del mes más cálido de 24°C y una mínima media del mes más frío de 6°C. La suma térmica sobre el umbral de 10°C o días-grado anuales en base 10°C es del orden de los 1500 días-grado, en cambio el número de horas de frío sobre 7°C o simplemente horas de frío para el período abril a noviembre, en base 7°C, es del orden de 610. El período libre de heladas se encuentra entre septiembre a mayo, totalizando 9 meses.

**2.- Hidango (6.2211):** Este agroclima se ubica cercano a la franja costera (Agroclima 6.274) y recorre paralelo al agroclima anterior de norte a sur el secano costero (Figura 2). La precipitación anual es de 897 mm siendo el mes más lluvioso junio, con una humedad relativa media anual del orden del 71%. La evapotranspiración de enero en promedio es de 6,1 mm/día, en cambio en el mes más frío es del orden de 1 mm/día, siendo el valor anual alrededor de 1000 mm. La temperatura media anual es del orden de los 13,6°C, con una temperatura máxima del mes más cálido de 24,7°C y una mínima media del mes más frío de 5,4°C. La suma térmica o días-grado anuales en base

10°C es del orden de los 1328 días-grado, en cambio las horas de frío anuales en base 7°C entre los meses de marzo a diciembre son del orden de 581. El período libre de heladas se encuentra entre octubre a mayo, totalizando 8 meses.

**3.- Pumanque (6.2332):** Este agroclima se encuentra a continuación del 6.2211, en una franja paralela al agroclima anterior de norte a sur el secano costero (figura 2). El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 623 mm (de acuerdo a los resultados de este proyecto) siendo el mes más lluvioso junio, con una humedad relativa media anual del orden del 70%. La evapotranspiración de enero en promedio es de 6,3 mm/día, en cambio en el mes más frío es menor de 1 mm/día, totalizando anualmente aproximadamente 1200 mm. La temperatura media anual es del orden de los 14,9°C, con una temperatura máxima del mes más cálido de 27,7°C y una mínima media del mes más frío de 5,8°C. La suma térmica o días-grado anuales en base 10°C es del orden de los 1800 días-grado, en cambio las horas de frío entre marzo y noviembre en base 7°C es del orden de 660. El período libre de heladas se encuentra entre septiembre a junio, totalizando 10 meses.

**4.- Talca (6.2222):** Este agroclima se encuentra a continuación del 6.2332, que se inicia en la Región de O'Higgins y continúa hacia el sur, Región del Maule, por el valle central. Este agroclima solamente se encuentra en lugares muy específicos al interior del secano, lo que se observa en la figura 2. El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 735 mm siendo el mes más lluvioso junio, con una humedad relativa media anual del orden del 69%. La evapotranspiración de enero en promedio es de 6,4 mm/día, en cambio en el mes más frío es menor de 1 mm/día, sumando anualmente del orden de 1300 mm. La temperatura media anual es del orden de los 14,9°C, con una temperatura máxima del mes más cálido de 30,8°C y una mínima media del mes más frío de 3,8°C. La suma térmica o días-grado anuales en base 10°C es del orden de los 1854 días-grado, en cambio las horas de frío anuales en base 7°C es del orden de 1300. El período libre de heladas es entre octubre y abril, totalizando 7 meses.

## 1.2 TOPOCLIMATOLOGÍA DEL SECANO

La elaboración de la cartografía digital, se realizó mediante la utilización de un modelo estadístico que muestra las relaciones topoclimáticas de las variables termopluviométricas. Para el cálculo de la distribución espacial de una determinada variable meteorológica, se consideró que ésta se encuentra condicionada por la topografía y el estado de superficie de la zona. La hipótesis fundamental es que cualquier variable meteorológica puede ser expresada como una combinación de variables ambientales. Esta hipótesis permite la construcción de modelos topoclimáticos que pueden cuantificar la variación espacial de una variable climatológica, lo que comúnmente es llamado topoclimatología.

Los procesos de obtención de cartografías climáticas se ven condicionados por la disponibilidad y calidad de datos, los cuales provienen principalmente de estaciones meteorológicas ubicadas en un punto en el espacio. Dada la importancia de contar con dichos datos para la elaboración de estudios en un determinado territorio y considerando las limitaciones asociadas con la falta de una buena cobertura de estaciones meteorológicas y el carácter continuo de la distribución de las variables climáticas se hace necesaria la generación de modelos de estimación de información climática. Estos modelos son útiles para estimar espacialmente el fenómeno de inestabilidad paramétrica continua (Draper y Smith, 1981). Para el caso de datos ambientales las regresiones globales se utilizan para describir mediante una ecuación única el comportamiento espacial de una variable; sin embargo, los coeficientes de esta ecuación varían espacialmente (Morales, 1997, Morales et al. 2007, Morales et al. 2010). Esta búsqueda es realizada mediante una metodología denominada mínimos cuadrados ponderados; siendo estos pesos ponderadores de una función de la distancia entre cada punto y el resto (Berry y Feldman, 1985; Fotheringham et al. 2000). En base a lo anterior, la modelación de las distintas variables climáticas puede ser realizada mediante la aplicación de un modelo matemático descrito por la Ecuación 1:

$$y_i = a_0(u_i, v_i) + \sum_k a_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

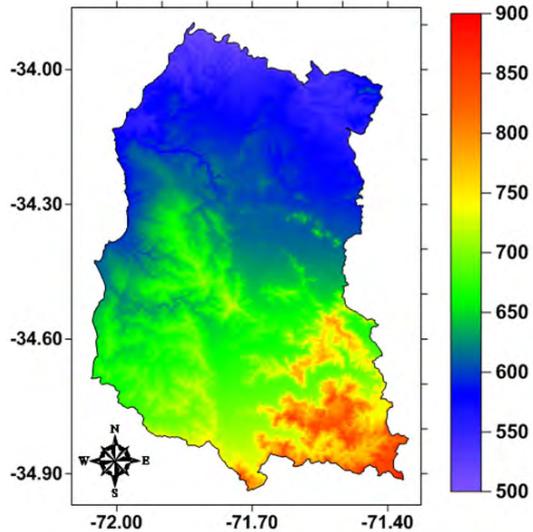
Donde;  $(u_i, v_i)$  indica las coordenadas del punto  $i$ th en el espacio,  $y_i$  es el valor de la variable dependiente,  $x_{ik}$  es una variable independiente descriptora en el punto  $i$ ,  $a_k(u_i, v_i)$  es un parámetro de la regresión en cada punto de la variable independiente y  $\varepsilon_i$  es el error en el punto  $i$ .

Desde el punto de vista práctico, mientras un punto esté más lejano a  $i$ , menos influencia estadística tendrá sobre la relación numérica final (Morales et al., 2007). Es importante mencionar que las variables descriptoras  $x_{ik}$  pueden ser derivadas de interacciones o potencias de las variables fundamentales (Morales et al, 2006). A partir de estos modelos espaciales fundamentales se pueden derivar parámetros bioclimáticos agrupados en cuanto a su carácter hídrico, térmico o energético. El método anterior fue aplicado a series de tiempo de variables climatológicas de las localidades de la Región, centrado en el período 1950 a 1990, considerando un número mínimo de 10 años de datos en la estación para calcular los promedios.

### **1.2.1 Precipitación anual**

Los patrones de variabilidad espacial de precipitación se muestran en la Figura 3, los cuales concuerdan con las descripciones de los distritos agroclimáticos de Nova et al. (1989). Dicho patrón presenta un marcado aumento de la precipitación de norte a sur, en sentido de la entrada de los sistemas frontales a la región. En el área del litoral

se muestra la misma tendencia, mostrando una variación aproximadamente desde los 500 mm a cerca de los 700 mm. La tendencia observada de la precipitación anual es aumentar desde mar a cordillera, hecho que se observa notablemente en la zona sur este del secano de la región, llegando a montos del orden de los 800 mm en promedio. A nivel regional, la precipitación tiende a aumentar de norte a sur, mientras que hacia la Cordillera de los Andes los valores van desde los 900 hasta los 1400 mm.



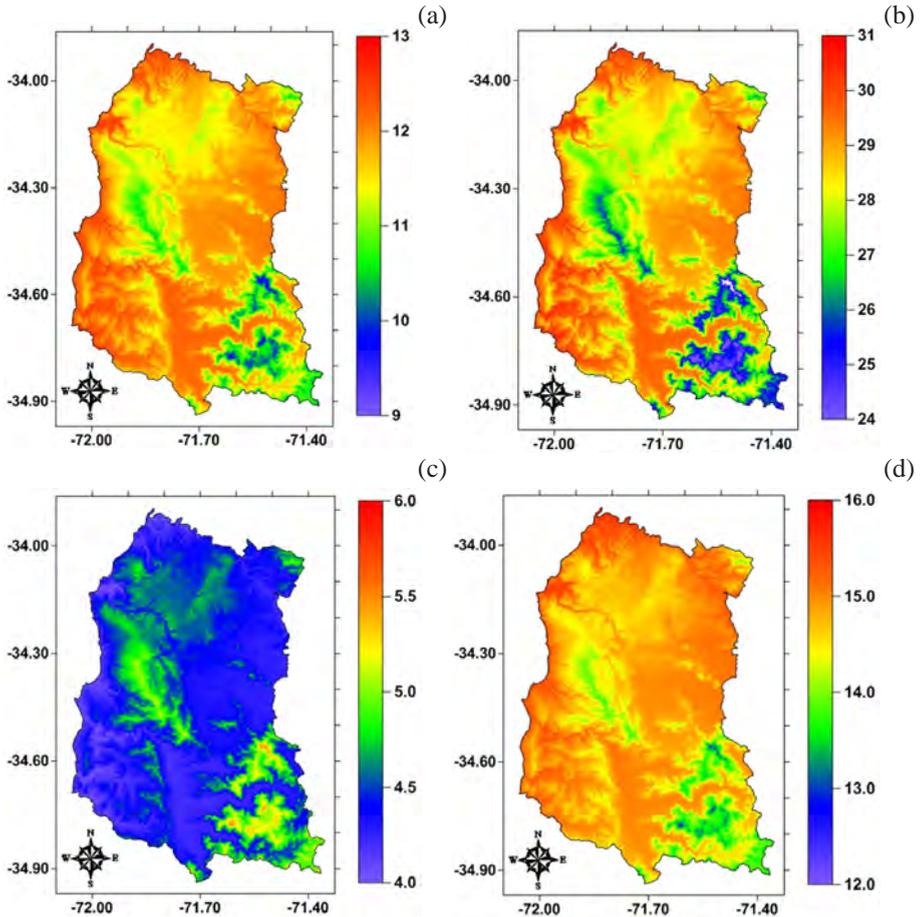
**Figura 3.** Precipitación media anual [mm] para la zona del Secano de la Región de O'Higgins.

### 1.2.2 Temperatura

La Figura 4 muestra las cartas de temperaturas mínimas y máximas medias para los meses de enero y julio. Al respecto, se observa un patrón espacial típico de esta latitud, esto es el campo térmico dependiente de la distancia al litoral y la altura. En relación a la temperatura media mínima mensual, se observan islas de calor asociadas a valles y topografía en el mes de enero (Figura 4a), cuyas temperaturas alcanzan entre los 9°C y los 13°C. Las temperaturas más altas se observan en sectores de valles y se incrementan alejándose de la costa, en cambio las más bajas en los sectores más altos. Por otra parte, en el mes de Julio (Figura 4c) la temperatura máxima alcanza entre los 12 °C a los 16°C, en un patrón asociado a la distancia al litoral y la altitud. Los valles muestran temperaturas más bajas, con valores que oscilan entre los 4°C y 5°C.

Para la temperatura media mensual máxima en el mes de Enero (Figura 4b) se observa claramente la influencia oceánica, manteniendo una temperatura media máxima de entre 24°C a los 31°C en el transepto desde costa hacia el interior. Son los valles los que muestran las más altas temperaturas, oscilando entre los 27 a 31°C. El efecto de

la altitud se observa más claramente en la Cordillera de los Andes, sin embargo en la zona sur-este del secano se puede observar este mismo efecto, el descenso de la temperatura con la altura. La temperatura media mensual máxima del mes de Julio (Figura 4d) muestra una distribución espacial más homogénea, con un gradiente de temperatura que disminuye de norte a sur. Las temperaturas más altas se producen hacia el noroeste de la región, con valores que oscilan alrededor de los 16°C. Hacia el este las temperaturas disminuyen por efecto de la altitud, alcanzando temperaturas entre los 12°C y los 14°C. Hacia el sur los valores disminuyen por efecto de la latitud, observándose un gradiente menos pronunciado que el producido por la altitud.



**Figura 4.** Temperaturas extremas medias [°C] del mes más cálido (enero) y del más frío (julio): (a) Mínima de enero, (b) Máxima de enero, (c) Mínima de julio y (d) Máxima de julio en la zona del secano de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

## Días grado y Horas de frío

La acumulación de calor por sobre 10°C se ha usado tradicionalmente como un índice de disponibilidad térmica para el desarrollo de las plantas. En otras palabras esta acumulación de calor o termoperiodo es la suma de calor por sobre el umbral o base (ej. 10°C) para alcanzar un determinado estado fenológico y se expresa como días-grado (DG). El DG es la temperatura media menos la base, lo que es válido solamente si la distribución diaria de la temperatura es sinusoidal. Actualmente existen diversos métodos para el cálculo de los DG anuales destacándose los propuesto por Hajek y Gutiérrez (1979), Arnold (1959), Ometto (1981) y Snyder (1985). En el presente estudio se aplicó el método de Arnold (1959), principalmente debido a que demanda un reducido número de variables de entrada (Ecuación 2).

$$GD = \sum_{i=1}^{12} (T - T_B) \cdot N_m \quad (2)$$

Donde T corresponde a la temperatura media diaria (°C),  $T_B$  es la temperatura umbral (10°C) y  $N_m$  al número de días del mes.

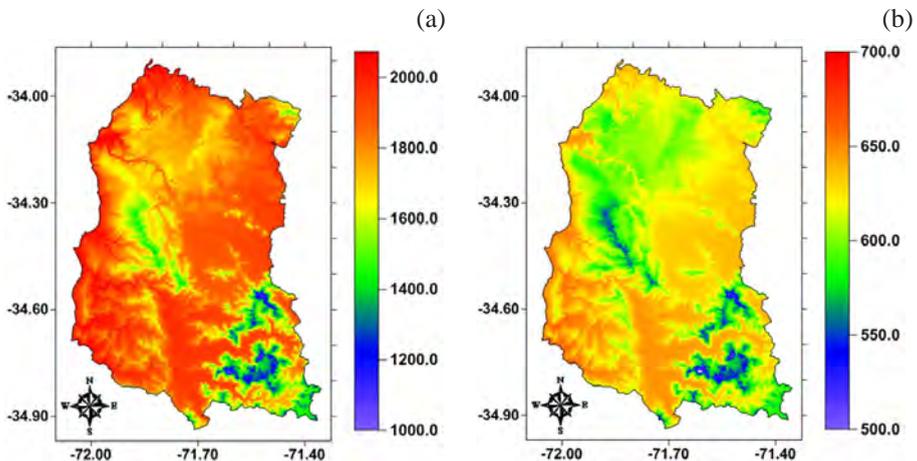


Figura 5. (a) Días-grado anuales en base 10°C y (b) Horas de frío anuales en base 7°C.

La cartografía de disponibilidad de frío invernal para su uso en la planificación agrícola ha sido un objetivo de importancia en investigación en agrometeorología tanto a nivel internacional como nacional (Luedeling et al. 2009). Tradicionalmente, las necesidades de frío invernal han sido estimadas a partir del concepto de horas frío (HF),

definiéndose éstas como el número de horas que pasa la planta, durante el periodo de reposo invernal, a temperaturas inferiores a un umbral dado. La literatura muestra que esta temperatura umbral estaría comprendida entre 4 y 12 °C, siendo frecuente que esta temperatura umbral se fije en 7°C (Melgarejo, 1996).

Varios modelos han sido desarrollados para el cálculo y estimación de HF, entre ellos el método para determinar el requerimiento de frío para frutales caducifolios propuesto por Weinberger (1950). Este método se basa en que las yemas deben permanecer un número de horas mínimas bajo una temperatura crítica ( $< 7$  y  $> 0^{\circ}\text{C}$ ) durante el período invernal (HF) para brotar adecuadamente en la primavera. De esta forma se han definido, de manera arbitraria y no por eso menos extendida, especies de bajo ( $< 500$  HF) y de alto requerimiento de frío ( $> 1000$  HF) (Tao, 2005). Esta nomenclatura y concepto de HF es la más utilizada en Chile, debido a su facilidad de cálculo ya que supone que sólo las bajas temperaturas dentro del rango definido determinan el frío acumulado. Sin embargo, el concepto de HF no se ajusta totalmente a las observaciones experimentales, ya que existen numerosos casos en la literatura en que para una misma variedad se han reportado distintos requerimientos de frío, dependiendo de la localidad (Powell, 1986). Las diferencias que se observan en la acumulación de HF en diferentes lugares puede deberse a dos tipos de factores: 1) la definición imprecisa del período en el cual se contabilizan las HF, y 2) no se considera el efecto que pueden ejercer las altas temperaturas invernales sobre la acumulación del frío invernal.

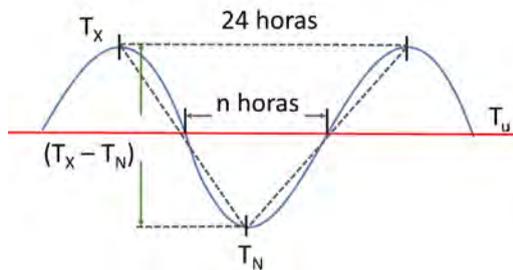
Un aspecto importante es el momento cuando iniciar el conteo y el término de las HF. Gil-Albert (1989), propone que una fecha de inicio del conteo es el estado fenológico de caída de hojas, sin embargo, se sabe que en ese momento la planta ya puede estar en reposo, por lo tanto acumulando frío. Para el caso del término del conteo, a pesar de que la determinación de esta fecha también puede conducirnos a un cierto error, el mismo autor propone que este sea cuando la planta ha cubierto sus necesidades de frío invernal. Se ha observado que en la mayoría de las investigaciones estas precauciones no se consideran y el momento de inicio del recuento de las HF se determina en forma arbitraria. El término del periodo generalmente se define como el momento de inicio de la brotación, produciendo divergencias en los resultados y una gran confusión conceptual (Allan, 2004).

En Chile se han desarrollado y aplicado diversos métodos para la estimación de HF, sobre todo orientados para la elaboración de una cartografía. Estos modelos se basan en relaciones estadísticas entre las HF medidas por una estación meteorológica y las temperaturas medias y/o mínimas medias mensuales. La característica en ellos es que se ajustan muy bien a la zona geográfica donde fueron creados, lo que los hace aplicables sólo a ellas. Un método usado para esta estimación se basa en la relación existente entre las HF las temperaturas extremas diarias, llamado fórmula de Crossa-Reynaud (1955).

$$n = K_{CR} \cdot 24 \cdot \frac{(T_u - T_X)}{(T_X - T_N)} \quad (3)$$

Donde  $n$  es el número diario de horas por debajo de una temperatura umbral, que comúnmente es  $7^\circ\text{C}$ , para un día específico,  $T_N$  y  $T_X$  es la temperatura mínima y máxima diaria respectivamente. Por otra parte  $K_{CR}$  es un coeficiente de ajuste a las condiciones locales el cual debe ser calculado para la zona geográfica en estudio a partir de registros diarios de temperaturas horarias. El valor de  $K_{CR}$  no siempre es constante, incluso en áreas pequeñas como un topoclima, por lo que se sugiere modelar su variabilidad espacial. Por ejemplo en áreas de la Región de Murcia, se han encontrado variaciones entre 0,90 y 1,9 en este coeficiente (Castillo y Castellvi, 1996; Melgarejo M., 1996; Melgarejo y Salazar, 2003). Pese a estas dificultades, este método es sencillo y fácil de aplicar, pero hay que tomar en cuenta que cuando la diferencia  $(T_u - T_X)$  sea negativa, no se debe acumular horas de frío. Lo anterior se debe a que este método considera que todas las temperaturas bajo el umbral tienen el mismo efecto y las sobre este umbral ninguno.

Para realizar la estimación anual a nivel geográfico hay que simular para cada día los valores de temperatura mínima y máxima a partir de registros históricos de variables meteorológicas. La Figura 6 muestra un esquema para la estimación del número de horas diarias bajo  $7^\circ\text{C}$  basado en una simplificación de la curva teórica de la evolución de la temperatura media diaria. En la figura 6, la línea roja indica la temperatura umbral a partir de la cual se cuantifica el número de horas bajo ella ( $n$ ), en una relación geométrica basada en la semejanza de triángulos con las temperaturas extremas, según la proposición de Crossa-Reynaud.



**Figura 6.** Esquema para la estimación del número de horas diarias bajo  $7^\circ\text{C}$ , según el método de Crossa-Reynaud.

La figura 5b muestra la aplicación del método de Crossa-Reynaud usando una temperatura umbral de  $7^\circ\text{C}$  para la zona del secano de la Región de O'Higgins. Los patrones

espaciales muestran claramente una estratificación con la topografía, específicamente la mayor acumulación se da en los valles, pero el efecto de la altitud aun no es tan marcado como hacia la zona de pre-Cordillera y Cordillera de Los Andes.

El método anterior, adolece de considerar el efecto negativo de las altas temperaturas invernales sobre la acumulación de frío, hecho que es importante en las zonas de climas subtropicales. En efecto, en estas regiones el frío acumulado estimado a partir de las HF, puede ser un mal indicador del frío efectivamente acumulado por las yemas (Byrne, 2005), al no considerar el efecto de las altas temperaturas que pueden ocurrir en invierno. Para subsanar esta deficiencia, se han desarrollado otros modelos que corrigen el efecto negativo de las altas temperaturas invernales, el cual ahora se expresa como Unidades de Frío (UF) (Richardson et al. 1974). En base al concepto anterior, se han generado los siguientes modelos para cuantificar las UF:

**a.- Modelo Utah:** Este modelo desarrollado por Richardson *et al.* (1974), en la Universidad de Utah (EE.UU), corrige el efecto de las altas temperaturas en invierno, de tal forma que todas las temperaturas no tienen el mismo efecto fisiológico para los frutales, lo que afecta la salida del reposo invernal. Una unidad de frío se define como la exposición de una planta a 6°C por una hora. Por lo tanto al subir o bajar la temperatura del punto óptimo, 6 °C, la contribución a las UF podría bajar o subir. Por ejemplo, una hora con temperaturas comprendidas entre 2,5 y 9,1 °C equivale a una UF, pero si las temperaturas son superiores a 16°C contrarrestan UF acumuladas. La Tabla 1 muestra en detalle la conversión de las temperaturas horarias °C a UF.

**Tabla 1.** Conversión de temperaturas (T) en unidades de frío (UF) para los modelos de Utah, Florida, Carolina del Norte y Dinámico.

Utah (1991)		Florida (1981)		Carolina Norte (1983)		Dinámico (1987)	
T (°C)	UF	T (°C)	UF	T (°C)	UF	T (°C)	UF
< 1,4	0,0	-1,0	0,0	-1,1	0,0	<0,0	0,20
1,5-2,4	0,5	1,8	0,5	1,6	0,5	2,0	0,30
2,5-9,1	1,0	8,0	1,0	7,2	1,0	4,0	0,65
9,2-12,4	0,5	14,0	0,5	13	0,5	6,0	0,90
12,5-15,9	0,0	17,0	0,0	16,5	0,0	8,0	1,00
16-18	-0,5	19,5	-0,5	19,0	-0,5	10,0	0,80
> 18	-1,0	21,5	-1,0	20,7	-1,0	12,0	0,40
				22,1	-1,5	14,0	0,00
				23,3	-2,0	16,0	0,00
						>20	-0,70

**b.- Modelo de bajas necesidades:** Este modelo fue desarrollado por Gilreath y Buchanan (1981), en la Universidad de Florida, donde los inviernos son más suaves que en Utah. El método es análogo al modelo Utah en su base conceptual, pero la máxima efectividad se obtiene para la temperatura de 8°C. La Tabla 1 muestra en detalle la conversión de las temperaturas horarias °C a UF para este método.

**c.- Modelo Carolina del Norte:** Este modelo fue desarrollado por Shaltout y Unrath (1983) en la Universidad del Estado de Carolina del Norte (EE.UU). Al igual que los modelos anteriores, sus bases conceptuales son similares, salvo que éste incorpora un mayor efecto negativo de las temperaturas superiores a 21°C. Este modelo considera que la máxima efectividad para la salida del reposo invernal se obtiene para la temperatura de 7,2°C. La Tabla 1 muestra en detalle la conversión de las temperaturas horarias °C a UF para el método descrito.

**d.- Modelo Dinámico:** Erez y Couvillon (1987) combinaron distintos ciclos de temperaturas bajas con temperaturas moderadas y establecieron este nuevo modelo, el cual considera la influencia de las temperaturas moderadas que se alternan con las bajas temperaturas durante el día. Específicamente, estos autores trabajaron sobre el ciclo diario reproduciendo artificialmente sus condiciones, estudiando el efecto de la luz, las temperaturas diurnas más altas y comparando con las temperaturas nocturnas, más bajas. Al combinar distintos ciclos de temperaturas diurnas y nocturnas desarrollaron este modelo llamado dinámico. Este modelo obtendrá teóricamente un resultado mayor que el de Utah, debido a que a los 16°C no se expresan valores negativos de UF, salvo en valores iguales o superiores a los 20 °C. Adicionalmente, este tipo de orientación metodológica fue elaborada y aplicada para el mismo objetivo por Fishman et al. (1987) en Israel. La Tabla 1 muestra en detalle la conversión de las temperaturas horarias °C a UF para el método descrito.

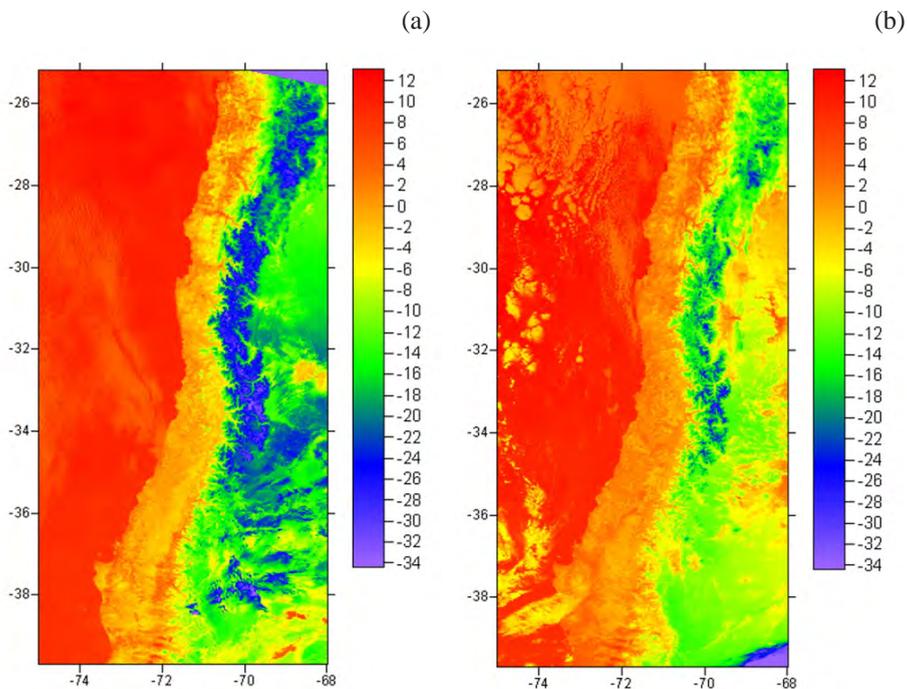
## Heladas

En Chile, históricamente las heladas han generado importantes pérdidas en el sector productivo agrícola, sobre todo en el Valle Central del país donde hay más de un millón de hectáreas que reciben el impacto recurrente de las heladas de primavera. Los daños provocados alcanzan niveles críticos cada cierto número de años. El análisis de series de datos meteorológicos permite constatar que cada 10 o 12 años se producen heladas tardías (Septiembre-Octubre), cuyo efecto económico es crítico, pero además eventos extremos cuyo período de retorno varía entre 30 y 60 años, donde los impactos son enormes. Tenemos aun en la memoria los eventos del año 2007 y 2013, que causó graves daños en viñas, parronales y otros huertos, produciendo considerables pérdidas en la producción. Recordemos que los daños producidos por las heladas llevaron a la autoridad del momento en el 2007 a declarar Emergencia Agrícola entre

las Regiones de Atacama a Los Lagos, específicamente en las comunas mayormente afectadas. La figura 7 muestra dos imágenes de temperatura de superficie del satélite NOAA para las heladas de los días 17-08-2007 y el 14-09-2007 entre las regiones de Atacama hasta La Araucanía, Chile (Gentileza de Dr. Carlos Di Bella, INTA, Argentina). En el caso de la Región de O'Higgins, fueron 16 comunas las declaradas en Emergencia Agrícola: Las Cabras, Peumo, Quinta de Tilcoco, Malloa, Pichidegua, Rengo, San Vicente de Tagua Tagua, Lolol, Pumanque, Peralillo, Navidad, Litueche, Paredones, Pichilemu, La Estrella y Marchigüe. En esa oportunidad se cuantificó una merma de 50% en hortalizas y una pérdida total en carozos en algunos sectores.

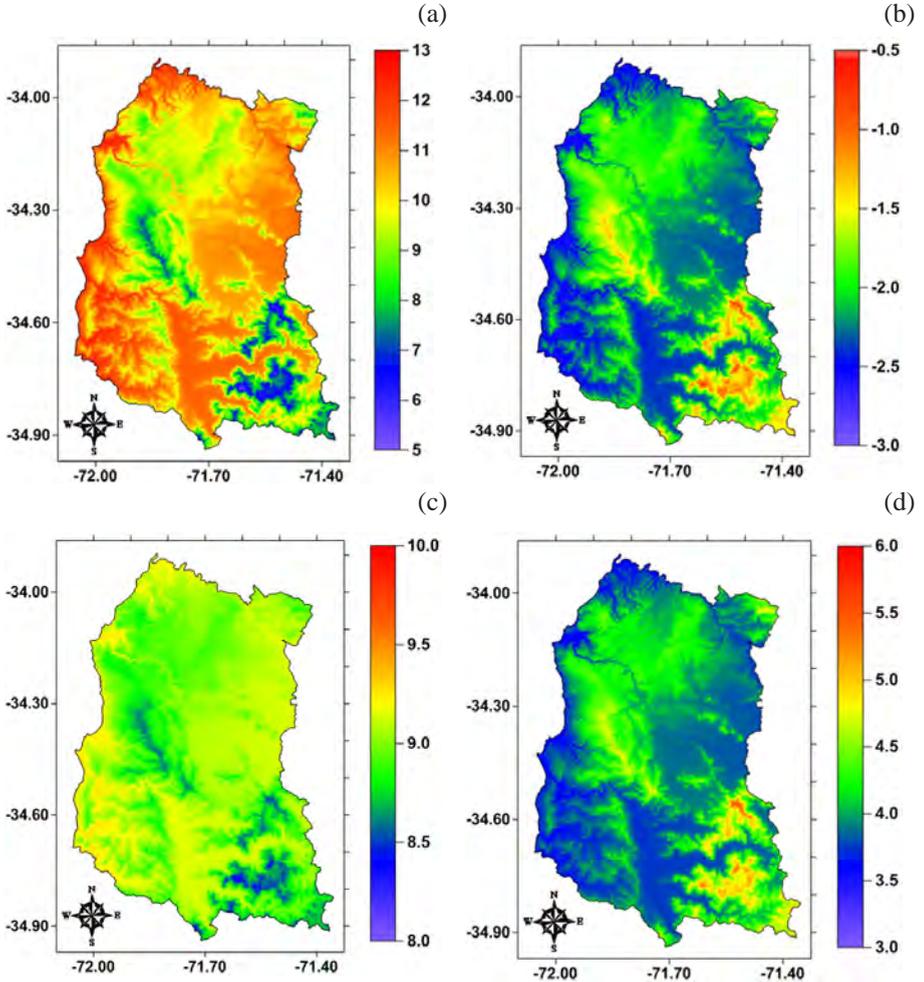
Una de las recomendaciones frente a los eventos de las heladas, es conocer el comportamiento espacial de las temperaturas mínimas, la cual puede ser usado para una gestión y planificación de la actividad agrícola. En este sentido, es necesario contar con una estrategia de prevención en primera instancia. Es conocido que existen dos formas de mitigar el impacto de las heladas, primero los métodos pasivos, que consiste en elegir la zona de cultivo, las especies y variedades, la orientación, la poda y densidad de plantación, así como todas aquellas técnicas apropiadas para disminuir el riesgo de heladas. En segundo lugar los métodos activos, que son aquellos aplicados justo antes de la helada o durante ella. Las críticas más comunes a estos métodos son su costo generalmente elevado, el momento de puesta en marcha y de detención del sistema debe ser conocido con precisión para reducir costos. Por lo general, para evitar una helada es suficiente, en teoría, aportar a la superficie del suelo una energía complementaria igual a aquella perdida por esta superficie, que es la que provoca el enfriamiento.

Nosotros pensamos que, en primera aproximación, es posible aportar al conocimiento de la distribución espacial de las heladas mediante la cartografía topoclimática asociada a este fenómeno, por ejemplo una visión probabilística del mismo basada en la simulación dinámica de la temperatura mínima. En el ámbito de la protección contra este tipo de fenómenos, es necesario comenzar con una aproximación de un método pasivo para aportar en la reducción del impacto generado por las heladas. El régimen de heladas del valle central de Chile, genera un riesgo cuantificable en los lugares que disponen de suficiente información histórica para ello. Por ello, es posible contar con información útil para poseer una evaluación detallada del riesgo, lo que podría contribuir enormemente a orientar esta actividad económica, es decir, orientar las zonas de plantación y la elección de variedades que minimicen el riesgo. A la vez que estas permitirían trazar las estrategias de control que tengan en cuenta la variabilidad espacial en la intensidad del fenómeno.



**Figura 7.** Imágenes térmicas del satélite NOAA-AVHRR para las heladas del (a) 17-08-2007 y el (b) 14-09-2007 entre las regiones de Atacama hasta La Araucanía, Chile (Gentileza de Dr. Carlos Di Bella, INTA, Argentina).

La figura 8 muestra las imágenes del número de heladas anuales, temperatura mínima absoluta anual, probabilidad de heladas septiembre y probabilidad de heladas octubre para la zona del secano de la Región de O'Higgins.



**Figura 8.** (a) Número de heladas anuales, (b) Temperatura mínima absoluta anual, (c) probabilidad de heladas septiembre y (d) probabilidad de heladas octubre para la zona del secano de la Región de O'Higgins.

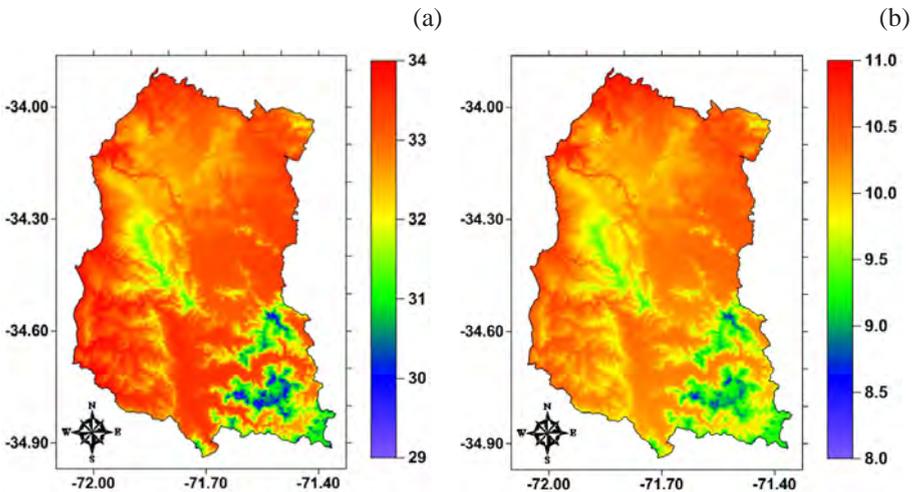
### 1.2.3 Radiación Solar Global

La radiación solar global para el secano de la Región de O'Higgins fue estimada a partir de la calibración realizada a la ecuación de Hargreaves-Samani (Hargreaves, 1982, Allen et al., 1997), dada por la ecuación 4.

$$K_R(T, P) = K_{RA} \cdot \sqrt{\left(\frac{P}{P_o}\right)} \cdot \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} \quad (4)$$

Donde P es la presión atmosférica (kPa) para un lugar específico, P<sub>o</sub> la presión atmosférica a nivel del mar (101.3 kPa) y K<sub>RA</sub> es un coeficiente empírico, con valores sugeridos por la literatura de 0.17 para regiones interiores y 0.2 para zonas costeras, sin embargo es necesario calibrarlos a nivel territorial (Allen, 1997; Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1982; Mendicino and Senatore, 2013). La radiación solar extraterrestre o radiación de Angot, se estimó a nivel diario como una función de la latitud de la localidad y del día del año.

Mediante el uso de las herramientas de programación que ofrece Vba-Excel, se implementó el modelo de simulación matemático simple, para calcular la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual sobre toda la zona del secano en formato matricial o raster (Eastman, 2006). Las matrices obtenidas para los meses de enero y julio que representan la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual sobre la zona central de Chile, están expresados en MJ/m<sup>2</sup> día. La Figura 9 muestra la radiación solar global de enero y julio en [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>] para la zona del secano de la Región de O'Higgins.



**Figura 9.** Radiación solar global de (a) enero y (b) julio en [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>] para la zona del secano de la Región de O'Higgins.

### 1.2.4 Evapotranspiración de Referencia

Para estimar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se utilizó la ecuación de Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985), la cual ha sido utilizada en Chile debido a su bajo requerimiento de información meteorológica, esto es, permite el cálculo de la ET<sub>o</sub> a partir de datos de temperatura y humedad relativa (Torres y Vásquez, 2013; Rivano y Jorge Jara, 2005; Flores y Antonioletti, 1999; Valenzuela y Ferreira 1985; Rovira, 1976; Ferreira y Valenzuela, 1975; León, 1975). El método propuesto por Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985) para estimar la ET<sub>o</sub> necesita datos de temperatura y de radiación solar, medida o estimada. La expresión general es la siguiente:

$$ET_o = K_{HS} \cdot \left(\frac{R_g}{\lambda}\right) \cdot (T_a + 17.78) \quad (5)$$

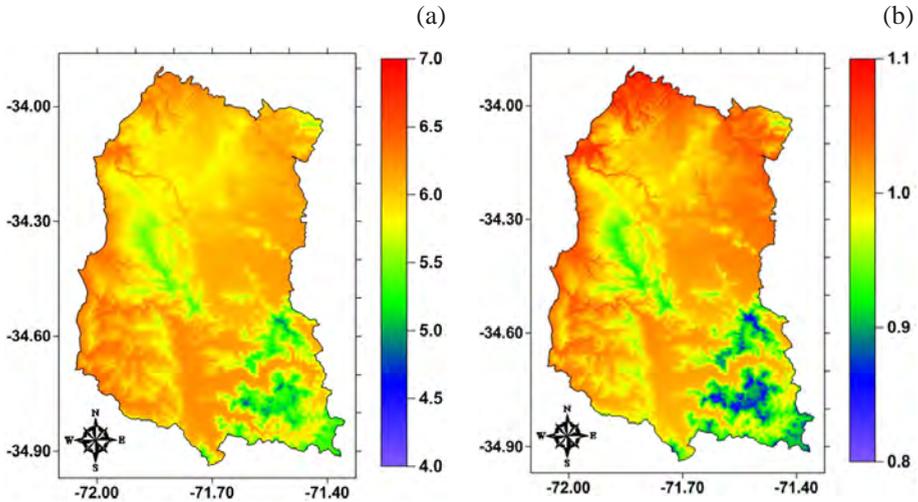
Donde ET<sub>o</sub> es la evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>), K<sub>HS</sub> es un coeficiente empírico cuyo valor es 0.0135 y debe ser ajustado en cada localidad, T<sub>a</sub> es la temperatura media diaria del aire (°C), R<sub>g</sub> es la radiación solar global incidente (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) y λ es el calor latente de evaporación (MJ kg<sup>-1</sup>), dado por:

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 \cdot T_a \quad (6)$$

Para encontrar los coeficientes K<sub>HS</sub> más apropiados, se realizó una corrección comparando los valores obtenidos por Penman-Monteith y Hargreaves-Samani. La ecuación de Penman-Monteith está dada por (Allen et al., 1998)

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273}\right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (7)$$

Con este procedimiento se calculó el coeficiente K<sub>HS</sub> para la zona del secano de la Región de O'Higgins, encontrándose valores entre 0.01086 para zonas próximas a la costa a 0.01276, para zonas más interiores y depresión intermedia. La Figura 10 muestra la Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en [mm día<sup>-1</sup>] para los meses de (a) enero y (b) julio para la zona del secano de la Región de O'Higgins.



**Figura 10.** Evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) en [mm día<sup>-1</sup>] para los meses de (a) enero y (b) julio para la zona del secano de la Región de O'Higgins.

### 1.3 REFERENCIAS

Allan, P., 2004. Winter chilling in areas with mild winters: its measurement and supplementation. *Acta Horticulturae* 662: 47-52.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. FAO Drainage and Irrigation paper N° 56. Rome, Italy. 300p.

Arnold, C.Y., 1959. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* 74:430-445.

Berry, W., Feldman, S., 1985. Multiple regression in practice, quantitative applications in the social science. SAGE, London.

Byrne, D.H. 2005. Trend and progress of low chill stone fruit breeding. P. 5-12. ACIAT Technincal Report N° 61. In George, A and U. Boonprakoh (eds). Production Technologies for low-chill temperate fruits. Reports from the 2<sup>nd</sup> International Workshop, Chiang Mai, Thailand. 19-23 April 2004. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Canberra, Australia.

Campos Aranda, Daniel F. 2005. Agroclimatología cuantitativa de cultivos. Editorial Trillas, Mexico, 320 pp.

Castillo Francisco y Castellvi Francesc. 1996. Agrometeorología. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España. 517 pp.

Crossa-Raynaud P. 1955. Effets des hivers doux sur le comportement arbres fruitieres a feuilles caduques. Ann. Serv. bot. et agron. Tunis 28, N° 3, 22.

Del Pozo, A., y P. del Canto. 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos de la VII y VIII regiones. Serie Quilamapu N° 113. 115 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.

Dirección meteorológica de Chile. 2001. Climatología Regional. Departamento de Climatología y Meteorología. [http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia\\_regional.pdf](http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia_regional.pdf).

Dirección meteorológica de Chile. Climas de Chile. Departamento de Climatología y Meteorología. <http://www.meteochile.cl/climas/climas.html>.

Draper, N.R. y Smith, H. 1981. Applied regression analysis. (2<sup>nd</sup> Ed.) New York: Wiley.

Eastman J. Ronald, 2006, IDRISI Andes, Guide to GIS and Image Processing, Clark Labs, Clark University.

Erez, A. y G.A. Couvillon. Characterization of the influence of moderate temperatures on rest completion in peach. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 112(4): 677-680.

Ferreira Saavedra, Víctor y Valenzuela A., Alejandro. 1975. Cálculo de la evapotranspiración potencial para Chile. Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.

Fishman, S., Erez A., and Couvillon G.A. 1987. The temperature dependence of dormancy breaking in plants: Computer simulation of processes studied under controlled temperatures. J. Theor. Bio. 126: 309-321.

Flores S., Eusebio y Antonioletti R., Rodrigo. 1999. La evapotranspiración potencial como expresión de las necesidades de agua de los cultivos y sus métodos. Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas 1999, págs. 31-37.

Fotheringham, S., Brundson, Ch, Charlton, M., 2000. Quantitative Geography, Perspective on spatial data analysis. SAGE publications, London.

Fotheringham, S., Brundson, Ch, Charlton, M., 2002. Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships, WILEY, West Sussex.

Gil-Albert, F. 1989. Tratado de arboricultura frutal. Vol II: la ecología del árbol frutal. 2<sup>da</sup> ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 236p.

Gilreath, P.R. y D.W. Buchanan. 1981. Rest prediction model for low-chilling 'Sungold' nectarine. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 106(4): 426-429.

Hajek, E.R., Gutierrez, J., 1979. Periodos vegetativos en Chile: Un enfoque basado en la temperatura. Cienc. Inv. Agr. 6:21-49.

Hargreaves G.H., Allen R.G. 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129(1): 53-63.

Hargreaves, G., Samani, Z., 1982. Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 108, 225-230.

Hargreaves, G.H. 1989. Accuracy of estimated reference crop evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Eng. 115(6), 1000-1007.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99.

Iqbal, M., An Introduction to Solar Radiation, New York: Academic Press, 1983, p. 101.

León Sade, Ricardo Guillermo. 1975. Requerimientos de agua desde Los Ángeles a Puerto Montt. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.

Luedeling, E., Zhang, M., McGranahan G., Leslie C. 2009. Validation of winter chill models using historic records of walnut phenology. Agricultural and Forest Meteorology 149(11): 1854-1864.

Martínez-Romero A., J.F. Ortega, J.A. de Juan, J.M. Tarjuelo y M.A. Moreno. 2012. Modelos de estimación de radiación solar global con limitación de datos y su distribución espacial en castilla-la mancha. Información Técnica Económica Agraria, vol. 108 N° 4:426-449.

- Melgarejo, M. 1996. El frío invernal, factor limitante para el cultivo frutal: modelos y métodos para determinar la acumulación de frío y calor en frutales. Vicente Ediciones. Madrid, España. 166p.
- Melgarejo, P. y D. Salazar. 2003. Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas vol. II. El algarrobo, granado y jinjolero. Ed. Mundi-prensa y AMV. Madrid, España. 442 p.
- Mendicino G. and Alfonso Senatore. 2013. Regionalization of the Hargreaves coefficient for the assessment of distributed reference evapotranspiration in southern Italy. J. Irrig. Drain. Eng. 139:349-362.
- Morales Luis, Canessa Fabricio, Mattar Cristian, Orrego Raúl y Matus Francisco. 2006. Characterization and edaphic and climatic zonification in the region of Coquimbo, Chile. Revista Chilena Ciencia del Suelo y Nutricion Vegetal 6(3): 52-74.
- Morales, L., Parra, J.C., and Espinosa, J., 2010. Generation of continuous rasters of climatological variables using geographic weighted regression. Proceeding book 3<sup>rd</sup> Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. Universidad de Valencia. España.
- Morales, L., 1997. Evaluación y zonificación de riesgo de heladas mediante modelización topoclimática. Tesis Doctorado, Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción (Chile).
- Morales, L., Canessa, F., Mattar, C., 2007. Comparison interpolation methods for detection of microclimate areas. 5<sup>th</sup> International Symposium 13-15 June, 2007.
- Novoa, R., y Villaseca, C. 1989. Mapa agroclimático de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Ministerio de Agricultura.
- Ometto, J.C., 1981. Bioclimatología vegetal. Sao Paulo: Agronómica Ceres, 440 p.
- Papadakis, Juan. 1970. Agricultural potentialities of world climates. Buenos Aires, Argentina. 70 pp.
- Poole Lon, Mary Borchers y Karl Koessel. 1981. Some common basic programs, TRS-80 Level II edition. MacGraw-Hill, USA.
- Powell, L. E. 1986. The chilling requirement in apple and its role in regulating time of flowering in spring in cold-winter climates. Acta Horticulturae, 179, 129-139.

Richardson, E. A., Seeley, S. D., and Walker, D. R. (1974) A model for estimating the completion of rest for 'Redhaven and 'Elberta' peach trees. *HortSci.* 9: 331-332.

Rivano, Fulvio y Jorge Jara R. 2005. Estimation of Crop Reference Evapotranspiration for Remehue-Osorno, X Region. *Revista Agro Sur*, Vol 33 (2) 49-61.

Santibañez, F. y Uribe, J.M. 1993. Atlas agroclimático de Chile. Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria, CORFO, Santiago, Chile. 99 p.

Shahidian, S., Serralheiro, R., Serrano, J., Teixeira, J., Haie, N. and Santos, F. (2012) Hargreaves and other reduced-set methods for calculating evapotranspiration. In: Irmak, A., Ed., *Evapotranspiration—Remote Sensing and Modeling*, InTech, Morn Hill, 59-80. doi:10.5772/725.

Shaltout, A.D. y C.R. Unrath. 1983. Rest completion prediction model for 'Starkrimson Delicious' apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108(6): 957-961.

Snyder, R.L., 1985. Hand calculating degree days. *Agriculture and Forest Meteorology* 35:352-358.

Tao, R., 2004. Studies of the gene expresión of dormant buds of Japanese apricot (*Prunus mume*). p. 48-53. ACIAT Technical Report N°61. In George, A and U. Boonprakoh (eds). *Production Technologies for low-chill temperate fruits*. Reports from the 2<sup>nd</sup> International Workshop, Chiang Mai, Thailand. 19-23 April 2004. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Canberra, Australia.

Torres Hernández, Amador y Vásquez Vásquez, Rodrigo. 2013. Prospección de la estimación de la evapotranspiración de referencia, bajo las condiciones del valle de Chaca, Arica-Chile. *Revista Idesia*, 31(2): 25-29.

Uribe JM, R Cabrera, A De La Fuente y M Paneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Laboratorio de Bioenergía y Biotecnología Ambiental, Depto. De Ciencias Ambientales y Recursos Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. ANDROS Impresores. Santiago, Chile. 232 pp.

Valenzuela, A. y Ferreira, V. Variación de la evapotranspiración potencial en Chile. *Agro-Ciencia*, 1985, vol. 1, N° 1, p. 15-21.

Wienberger, J.H., 1950. Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 56: 122-128.

# Capítulo 2

GENERADOR  
CLIMÁTICO

**Autor:**

Dr. Luis Morales S.  
Profesor  
Depto. Ciencias Ambientales y Rec.  
Naturales Renovables  
Facultad de Ciencias Agronómicas  
Universidad de Chile



## 2.1 INTRODUCCIÓN

En muchos casos, específicamente aquellos relacionados con estudios hidrológicos a nivel local, es necesario contar con datos diarios de montos de precipitaciones (Gabriel y Neumann, 1962; Todorovic y Woolhiser 1975). Por ejemplo para el diseño de distintas obras hidráulicas, estudios hidrológicos a nivel de cuencas, estudios de evaporación del suelo o desde embalses, movimiento de contaminantes en el suelo y simulación del comportamiento hidrológico de una cuenca a partir de modelos numéricos. Uno de los problemas recurrentes en Chile es que las series de tiempo de datos son insuficientes, además que sólo hay valores medios mensuales y no datos diarios, como se requiere. En Chile es fácil encontrar valores medios mensuales para muchas localidades, que corresponden a valores climatológicos de variables meteorológicas como precipitación, temperaturas (medias, máximas y mínimas), radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, evaporación, entre algunas. Normalmente estas bases de datos se encuentran compiladas en libros y estudios específicos. Producto de estas deficiencias, es necesario generar “datos pseudo-meteorológicos a nivel diario” (llamados por algunos autores “datos climáticos”, como nos referiremos de ahora en adelante) para satisfacer las necesidades de información para poder correr modelos de simulación hidrológicos. Una de las imposiciones sobre datos climáticos generados por algoritmos numéricos es que deben poseer las mismas características estadísticas que los datos climáticos reales que derivan. Estos datos generados son válidos para el área geográfica de la que provienen y para un intervalo de tiempo similar a los datos originales.

Este tipo de modelos son llamados comúnmente Generadores Estocásticos de Clima (Stochastic weather generators WGs, en inglés) o generadores climáticos y su objetivo es la simulación rápida de series de tiempo de variables aleatorias climáticas, tales como: temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa y el viento a nivel diario (Wilks y Wilby, 1999). En la literatura científica se observan varias propuestas metodológicas para la implementación de códigos numéricos (modelos) con el objetivo de reproducir de forma estocástica datos climáticos (pseudo-meteorológicos) para períodos largos de tiempo (Bond, 1979; Nicks y Harp, 1980; Bruhn et al., 1980; Richardson, 1981; Richardson y Wright, 1984). Una de las aplicaciones iniciales fue la simulación de ocurrencias de precipitaciones aplicando cadenas de Markov de dos estados y sus montos o intensidades por variables aleatorias que poseían una función de distribución única (voir aussi Katz, 1977). En este tipo de modelo en cada día existen dos tipos de estado posibles en la cadena de Markov, esto es, llueve o no llueve. Por lo tanto, si el modelo determina que llueve, entonces, otra rutina numérica calcula el monto o intensidad asociada a ese evento. Posteriormente, en el generador propuesto por Katz (1977) se agrega la estimación de la radiación solar, después, Richardson (1981) acopla al modelo de precipitaciones la estimación de la temperatura, en sus valores mínimos y máximos. Por ejemplo, en USA se ha utilizado en forma extensiva

el modelo WGEN (Richarson y Wright, 1984), el cual a partir de datos medios mensuales es capaz de generar buenas estimaciones diarias de: precipitación, temperaturas máximas y mínimas, y radiación solar. Este modelo, en su concepción original fue diseñado para mantener una interdependencia entre las variables que está generando a nivel diario. Sin embargo, uno de los problemas que presenta WGEN es que requiere de registros de datos climáticos con una duración de 30 años o más para estimar sus parámetros. Esta limitación es compleja, sobre todo en lugares del mundo donde no se puede aplicar ya que no se cuenta con un número de registros aceptables.

Para resolver la necesidad de contar con grandes volúmenes de datos para encontrar parámetros adecuados de un modelo, Gaylon S. Campbell (1990) desarrolló una versión modificada de WGEN, llamada CLIMGEN. Este modelo posee muchas de las parametrizaciones ya ajustadas para la simulación de variables climáticas, por lo que sólo necesita valores medios mensuales de las variables. Este hecho hace que sus códigos sean aplicables en lugares donde la limitación de datos climáticos es considerable, que es el caso del Secano de la Región de O'Higgins, situación por la cual basamos la generación de datos a nivel de cuenca en el modelo CLIMGEN (Stöckle et al., 1992; 1999).

## **2.2 GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE DATOS**

Entenderemos un proceso estocástico como un concepto teórico-matemático que es utilizado para referirse a magnitudes que son aleatorias y que varían con el tiempo. Cuando nos referimos a una variable aleatoria, hacemos hincapié en que ella deriva de un proceso probabilístico y que depende de una función de distribución de probabilidad. Un proceso de esta naturaleza puede estar compuesto de dos partes, un proceso determinístico puro y otro aleatorio o probabilístico puro, pero ambos se combinan para entregarle a la variable un comportamiento único. Este enfoque es de mucha utilidad cuando se desean generar variables climáticas a nivel diario, primeramente porque han sido aplicadas con éxito en otras partes del mundo, pero además por su fácil implementación computacional. Para generar las variables de precipitación, temperatura y evapotranspiración con el objetivo de correr un modelo hidrológico a nivel de cuenca, es necesario recurrir a la simulación estocástica. A continuación se mostrará metodológicamente para cada una de las variables climáticas antes mencionadas el procedimiento de estimación de ellas a partir de valores medios mensuales.

### **2.2.1 Precipitación diaria**

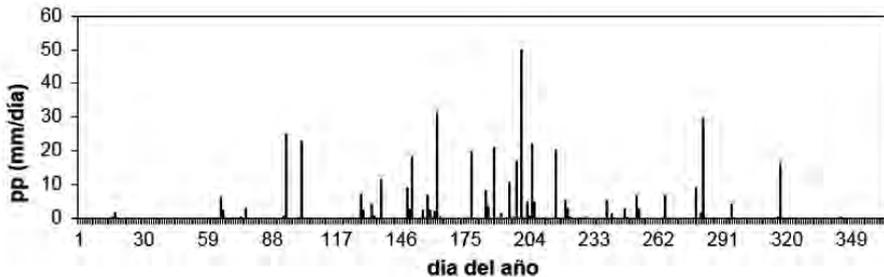
El fenómeno del monto diario de precipitación puede ser considerado de naturaleza estocástica. En efecto, esta premisa puede ser respaldada por el hecho de que asociado

a cada evento de monto diario de precipitación, existe una probabilidad de ocurrencia, que no necesariamente es independiente de los montos caídos en días anteriores. De esta forma podemos asociar a cada evento una cierta probabilidad de ocurrencia, que depende de los eventos anteriores, denominados probabilidades de transición. Podemos citar como ejemplo, la siguiente matriz.

$$P = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{vmatrix} \quad (1)$$

Donde  $p_{11}$  representa la probabilidad que llueva hoy, dado que ayer llovió,  $p_{12}$  la probabilidad que llueva hoy, dado que ayer no llovió,  $p_{21}$  la probabilidad que no llueva hoy, dado que ayer llovió y  $p_{22}$  la probabilidad que no llueva hoy dado que ayer no llovió. Estos valores de probabilidades de transición son estimados desde series históricas de datos pluviométricos. A un proceso de este tipo se le denomina proceso en cadena de Markov (Richardson, 1981; Geng et al, 1986; Selker and Haith, 1990).

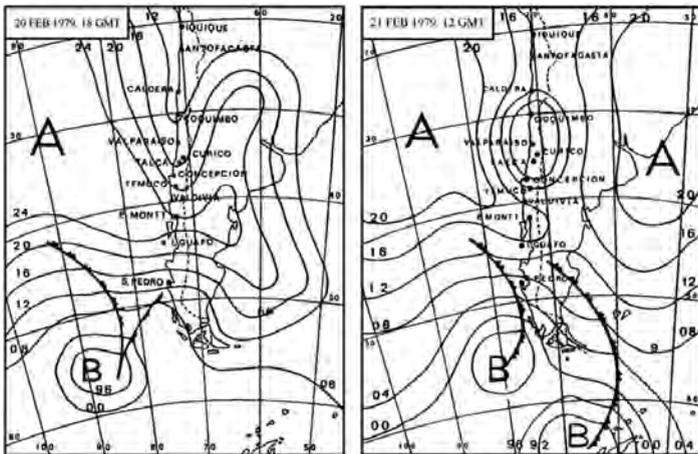
La Figura 1 muestra una aplicación de la rutina de generación de eventos de precipitación en una localidad del secano de la Región de O'Higgins. Como es una sola simulación, esta corresponde a un año teórico, el cual puede tener las características de cualquier año, ya sea considerado como un año lluvioso o seco. La simulación parte el 1 de enero (día=1) y termina el 31 de diciembre (Día=365), lo que queda expresado en día juliano. El generador de precipitaciones debe ser aplicado varias veces, por ejemplo 30 o 50 años, para generar todo tipo de situaciones climatológicas consistentes con las series reales de la cual provienen en cuanto a su caracterización estadística. Podría ocurrir que en algunas simulaciones el algoritmo entregue montos muy altos, ya que se usa la función de distribución de probabilidades de Weibull. Este caso es corregido mediante un filtro que restringe la precipitación máxima en 24 horas para ese evento a los valores climatológicos observados para un mes dado.



**Figura 1.** Aplicación de la rutina de generación de eventos de precipitación en una localidad del secano de la Región de O'Higgins para un año.

### 2.2.2 Frecuencia de precipitaciones

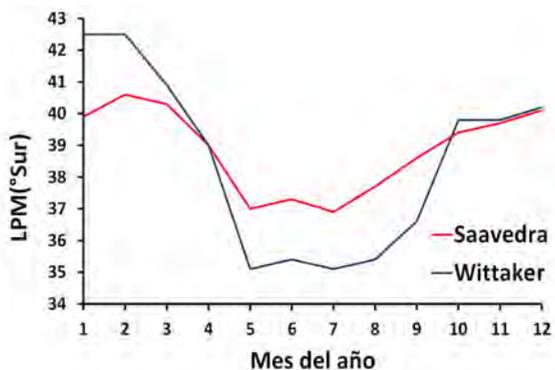
Para determinar la ocurrencia de un evento de precipitación a nivel diario para un mes específico, es necesario recurrir a parámetros de mesoescala. En este sentido, se han desarrollado varios estudios que permiten esbozar un esquema climático para la región central de Chile, considerando el resultado de la interacción media mensual entre los distintos centros de acción meteorológicos. Los grandes centros o masas de aire que se han detectado en la región central de Chile son: el Anticiclón del Pacífico (AP), las Bajas Polares (BP), la Depresión Continental (DC) y la Profundización de la Depresión Continental (PDC). A través de una inspección detallada de las cartas sinópticas diarias, es posible inferir que el dominio espacial de los centros mencionados anteriormente resulta ser acotado. En este sentido, el centro del Anticiclón del Pacífico se ubica entre las latitudes de Copiapó y Valparaíso, las Bajas Polares rara vez se encuentran al norte de La Serena y el centro de la Profundización de la Depresión Continental se observa normalmente entre La Serena y Los Ángeles (Parra y Morales, 1994). La Figura 2 señala dos cartas sinópticas que pueden ser consideradas como representativas de las condiciones meteorológicas predominantes en Chile, correspondientes a dos días consecutivos en Febrero del año 1979. En estas cartas sinópticas es posible observar que las curvas de isobaras forman una cuña en el continente cuya localización y presión máxima varía considerablemente de un día a otro. En la carta sinóptica correspondiente al 21 de febrero, la Depresión Continental y/o la Profundización de la Depresión Continental se encuentran al norte de la cuña, en cambio, al sur de la cuña se encuentran las Bajas Polares.



**Figura 2.** Cartas sinópticas registradas para el territorio chileno correspondientes al 20 y 21 de Febrero del año 1979, donde la letra A corresponde a las altas presiones y la letra B representa a las bajas presiones. (Fuente: Saavedra y Foppiano, 1992a).

Aunque en ocasiones las curvas de isobaras difieren significativamente de lo normal, su influencia no es importante cuando se calculan los valores medios mensuales de cualquier variable meteorológica. En consecuencia, ubicándose a una latitud al sur del Anticiclón del Pacífico, se observa sobre el continente una cuña de alta presión que penetra al litoral y que divide al territorio en tres regiones meteorológicamente diferentes, los lugares pertenecientes a la cuña misma y las regiones al norte y al sur de la cuña (Saavedra y Foppiano, 1992a). El comportamiento a lo largo del año de estos centros de acción meteorológicos permite explicar perfectamente bien las características fundamentales de los valores de la presión media mensual a lo largo de la región central de Chile. En esta línea de orientación, Saavedra (1985), a partir de las distribuciones medias mensuales de presión observadas a lo largo de Chile para el período 1911 a 1940 determinó la localización geográfica donde se ubican los valores máximos de presión media mensual en Chile, cuyo concepto fue denominado como Lugar de Presión Máxima (LPM) en Chile. La figura 3 muestra el ciclo anual de la distribución latitudinal del lugar de presión media mensual máxima en Chile.

En términos generales, en Chile se considera que el buen tiempo se encuentra en las áreas que están bajo el dominio de la Depresión Continental, resultado que se debe a la interacción entre el Anticiclón del Pacífico y el límite continental. Consecuentemente, la región puede ser considerada bajo el dominio del Anticiclón del Pacífico, donde prevalecen los vientos que soplan desde el sur, cielos claros y falta de lluvias. La Profundización de la Depresión Continental ocurre sólo esporádicamente, usualmente dos veces al mes durante el verano. Como una sombra y localizado bajos núcleos cálidos, se producen vientos con direcciones cambiantes sólo en localidades cercanas, acompañados rara vez por nubosidad y muy ocasionalmente produciendo alguna llovizna. Por otro lado, el mal tiempo está relacionado al dominio de las Bajas Polares, la cual está asociada con el frente polar. En este caso, los vientos soplan desde el norte, los cielos están nublados y la probabilidad de fuertes precipitaciones es bastante alta (Saavedra y Foppiano, 1992b).



**Figura 3.** Ciclo anual de la distribución latitudinal del lugar de presión media mensual máxima en Chile según Saavedra (1992) y Wittaker (1943). (Fuente: Parra y Morales, 1994).

Asumiendo que un escenario climático puede ser predicho manteniendo el mismo pronóstico meteorológico mencionado anteriormente, la localización de la presión media mensual máxima en Chile (LPM) puede ser utilizada como un punto que divide el territorio chileno en dos regiones meteorológicamente distintas. Las regiones ubicadas al sur del LPM estarían caracterizadas por lo que se llama subjetivamente mal tiempo, es decir, suficientes precipitaciones, días nublados a cubiertos y escasas horas de Sol. En cambio, las regiones ubicadas al norte del LPM estarían caracterizadas por buen tiempo, es decir, escasas precipitaciones, días parciales a despejados y suficientes horas de Sol. En este sentido y perteneciente a la cuña misma, se define al LPM como el lugar latitudinal de presión máxima en Chile, que deja al sur las Bajas Polares y al norte la Depresión Continental (DC) y/o la Profundización de la Depresión Continental. Además el LPM puede ser considerado como un índice de la interacción media mensual de los centros de acción meteorológicos (Saavedra y Foppiano, 1992c). En este sentido, Saavedra (1985) destaca el rol de descriptor que juega el Lugar de Presión Máxima para diversas variables climatológicas tales como la frecuencia de vientos norte y suroeste, la radiación solar, las horas de Sol, la nubosidad y la frecuencia de lluvias para Concepción, considerando a cada una de ellas como variables dependientes linealmente y exclusivamente de la posición del lugar de presión media mensual máxima en Chile. A partir de esta descripción, se desarrolló una expresión matemática entre el valor de las respectivas variables climáticas analizadas con respecto a la evolución anual del Lugar de Presión Máxima del siguiente tipo:

$$nrain(i) = a + b \cdot LPM(i) \quad (2)$$

Donde la variable dependiente representa el valor de la respectiva variable climática analizada, LPM es la posición latitud expresada en porcentajes de exceso o defecto relativo a la latitud de Concepción y las variables a y b corresponden a constantes relacionadas con la regresión lineal. Suponiendo que las variables climáticas en media mensual dependen linealmente del ciclo anual que presenta el Lugar de Presión Máxima, Parra y Morales (1994) elaboraron la recta de regresión que mejor representaba al conjunto de valores de estas variables climáticas en función de la posición latitudinal media mensual del LPM referida a la localidad de Concepción. En ambos casos de estudio, se destaca a la nubosidad como una de las variables climatológicas que mejor obedece a la bondad de ajuste del Lugar de Presión Máxima, a pesar de que la nubosidad es catalogada como una medida subjetiva desde el punto de vista observacional. Ajustando los coeficientes a y b de la ecuación 2 con datos tomados de los anuarios de la red de estaciones meteorológicas de la Dirección Meteorológica de Chile DMC, se obtuvo que los coeficientes pueden ser estimados localmente por

$$a = 75.75206699 * e^{-\frac{(LAT - 39.06748873)^2 + (LON - 73.65628557)^2}{2 (5.56028433)^2}} \quad (3)$$

$$a = -1.656285562 * e^{-\frac{(LAT - 38.11763101)^2 + (LON - 73.44712562)^2}{2 (5.053614053)^2}} \quad (4)$$

Estos coeficientes son dependientes de la latitud y la longitud de cada estación, como era de esperar en este tipo de regresión para poder representar adecuadamente la variabilidad espacial observada. Los coeficientes de la ecuación 2, dados por las ecuaciones 3 y 4 entregan un algoritmo simple para la estimación del número de días con lluvia en un mes dado. La idea es que las estaciones meteorológicas ubicadas al sur del LPM en un mes dado poseen mayor probabilidad de precipitación, en cambio las que se sitúan al norte del LPM su probabilidad es más baja.

Adicionalmente es posible estimar el número de días con lluvia en un mes  $nrain(i)$  a partir de la precipitación media mensual de una localidad, es estimada de acuerdo a

$$nrain(i) = Ca \cdot (1 - e^{-Cb \cdot ppm(i)}) \quad (5)$$

Donde los coeficientes Ca y Cb se calculan por

$$Ca = 28.5 \cdot e^{-\frac{(Abs(LAT) - 44.853263)^2}{2 \cdot (7.8438)^2}} \quad (6)$$

$$Cb = 54943.7 \cdot Abs(LAT)^{-0.1217 * ABS(LAT)} \quad (7)$$

Esta relación entrega adicionalmente el número de días con lluvia solamente a partir del monto mensual de precipitaciones, pero corresponde a una relación estadística entre ese parámetro y la latitud, por lo tanto es un valor referencial para el área de estudio.

### 2.2.3 Temperatura diaria

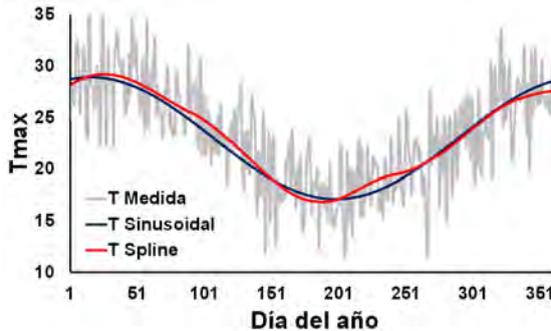
$$Y(i) = Y_{\max} - 0.5 (Y_{\max} - Y_{\min}) \left[ 1 - \text{seno} \left( \frac{2\pi}{365} (\phi + i) \right) \right] + \varepsilon \quad (8)$$

Una buena aproximación es utilizar un comportamiento sinusoidal para simular datos diarios de temperatura a partir de valores medios mensuales de Enero y Julio, esto es

Donde  $Y_{\max}$  corresponde al valor de enero,  $Y_{\min}$  corresponde al valor de julio,  $\phi$  es un

valor asociado al desfase,  $i$  es el día del año en valor juliano y  $e$  es el error asociado a la estimación que puede ser estimado a partir de una valor aleatorio con distribución normal.

El método propuesto por la ecuación 8 presenta algunas complicaciones, primeramente porque el período de la temperatura no es simétrico. Por ello cuando se cuenta con datos medios mensuales, esto es los 12 meses, es posible realizar una interpolación segmentaria entre meses para generar una curva anual más realista. La Figura 4 muestra los valores diarios de temperatura máxima de una localidad en Chile central (Gris), mostrando además los ajustes estimados a partir usando un ajuste sinusoidal (Azul) e interpolación spline (Rojo). Es posible notar en esta figura que el ajuste spline es mucho más realista que el ajuste sinusoidal (usado ampliamente en la confección de atlas climáticos y agroclimáticos) ya que puede reproducir adecuadamente las variaciones que ocurren entre estaciones. El ajuste sinusoidal por otra parte, no es un mal ajuste, sin embargo en otras variables muestra errores mayores, por lo que no es recomendable en todas las variables climatológicas.



**Figura 4.** Valores diarios estimados a partir de la ecuación y para temperatura de una localidad de la Zona Central de Chile usando un ajuste sinusoidal (Azul) e interpolación spline (Rojo).

### Interpolación Segmentaria

Este tipo de interpolación es conocida como interpolación segmentaria o spline (Burden, 1985). Tradicionalmente se utiliza un solo polinomio para interpolar datos, sin embargo este método usa ajustes locales de polinomios por segmentos en la serie de datos. Las funciones o polinomios ajustados pueden ser de diferente orden, siendo el cúbico el que ha dado mejores resultados en todos los casos. De esta forma, podemos decir que las funciones tipo spline se encuentra formada por varios polinomios, donde cada uno puede ser definido en un intervalo específico, bajo condiciones de continuidad específicas.

Hemos elegido por la estructura de los datos climatológicos en Chile Central el método de interpolación por segmentos de grado 2. Para poder aplicar este método, se toman tres intervalos que se solapan en algún punto, luego en cada uno de estos intervalos se define una función polinomial de grado 2, esto es:

$$S(x) = \begin{cases} a_1 \cdot x^2 + b_1 \cdot x + c_1 \\ a_2 \cdot x^2 + b_2 \cdot x + c_2 \\ a_3 \cdot x^2 + b_3 \cdot x + c_3 \end{cases} \quad (9)$$

### 2.2.4 Evapotranspiración y Radiación Solar

Se implementó en la rutina numérica para generar evapotranspiración el método desarrollado por Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985), calibrado para la zona del secano de la Región de O'Higgins por el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). El método desarrollado por Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985) para estimar la Evapotranspiración de referencia necesita datos de temperatura y de Radiación Solar, medida o estimada. La expresión general es la siguiente

$$ET_o = K_{HS} \cdot \left( \frac{R_g}{\lambda} \right) \cdot (T_a + 17.78) \quad (10)$$

Donde  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $K_{HS}$  es un coeficiente empírico cuyo valor es 0.0135 y debe ser ajustado en cada localidad,  $T_a$  es la temperatura media diaria del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $R_g$  es la radiación solar global incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y  $l$  es el calor latente de evaporación ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ), dado por

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 \cdot T_a \quad (11)$$

Para encontrar los coeficientes  $K_{HS}$  más apropiados, se realizó una corrección comparando los valores obtenidos por Penman-Monteith y Hargreaves-Samani. La ecuación de Penman-Monteith está dada por (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left( \frac{900}{T + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (12)$$

Con este procedimiento se calculó el coeficiente  $K_{HS}$  para la zona del secano de la Región de O'Higgins, encontrándose valores entre 0.01086 para zonas próximas a la costa a 0.01276, para zonas más interiores y depresión intermedia.

En el caso de las estaciones chilenas que miden radiación solar o radiación global

registran los valores medios diarios o los horarios, en el caso de que la estación sea manual o automática. Ahora es posible que estos registros puedan ser almacenados en intervalos inferiores al horario, como por ejemplo 30 o 15 minutos. Tradicionalmente estos valores son almacenados en bases de datos en unidades de  $W m^{-2} día^{-1}$  o  $MJ m^{-2} día^{-1}$ , sin embargo podrían estar disponibles en otras unidades. La Tabla 1 muestra la conversión de unidades para algunos casos.

**Tabla 1.** Conversión de unidades de medición de la radiación solar.

Unidad origen	Factor multiplicador	Unidad destino
kWh $m^{-2}$	85984194	cal $cm^{-2}$
	3,6	MJ $m^{-2}$
MJ $m^{-2}$	277,777778	Wh $m^{-2}$
W $m^{-2}$	0,0864	MJ $m^{-2}$
	2,777778	Wh $m^{-2}$
J $cm^{-2}$	0,238845	cal $cm^{-2}$
	0,023884 5	Cal $cm^{-2}$
kJ $m^{-2}$	0,000277778	Wh $m^{-2}$
	11622447	Wh $m^{-2}$
Ly (cal $cm^{-2}$ )	0,041868 2	MJ $m^{-2}$

Cuando no se poseen datos de radiación solar es posible estimarla a partir de la información metodológica también incluida en el documento FAO-56. El algoritmo implementado para la estimación de la radiación global  $R_g$  se basa en el cálculo teórico de la radiación solar extraterrestre o radiación de Angot ( $R_a$ ) y modificarla por un coeficiente denominado transparencia de la atmósfera. Hargreaves-Samani (Hargreaves, 1982, Allen et al., 1997) propone la ecuación

$$\frac{R_g}{R_a} = K_R = K_{RA} \cdot \sqrt{\left(\frac{P}{P_o}\right)} \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (13)$$

Donde  $K_R$  es el coeficiente de transparencia de la atmósfera definido como la razón entre la radiación global medida en superficie y la radiación extraterrestre o de Angot. Además,  $P$  es la presión atmosférica (kPa) para un lugar específico y  $P_o$  la presión atmosférica a nivel del mar (101.3 kPa),  $T_{max}$  y  $T_{min}$  son las temperaturas máximas y mínimas diarias respectivamente y  $K_{RA}$  es un coeficiente empírico, con valores sugeridos por la literatura de 0.17 para regiones interiores y 0.2 para zonas costeras, sin embargo es necesario calibrarlos a nivel territorial (Allen, 1997; Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1982; Mendicino and Senatore, 2013). La radiación solar extraterrestre o radiación de Angot, se estimó a nivel diario como una función de la latitud de la localidad y del día del año, dada por la ecuación 14 (Allen, R.G. et al., 1998; Iqbal, 1983)

$$I_e = \left(\frac{1}{\pi}\right) \cdot I_{sc} \cdot E_o \cdot [h_s \cdot \text{Sen}(\phi) \cdot \text{Sen}(\delta) \cdot \text{Sen}(\omega_s) + \text{Cos}(\lambda) \cdot \text{Cos}(\phi) \cdot \text{Sen}(h_s)] \quad (14)$$

Donde  $I_{sc}$  es la constante solar ( $117.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $f$  es la latitud de la localidad,  $E_o$  es un factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre dad alrededor del sol,  $d$  es la declinación solar y  $\omega_s$  el ángulo horario solar. La distancia Tierra-Sol puede estimarse de forma simple por:

$$E_o = 1 + 0.033 \cdot \text{Cos} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{365} \right) \quad (15)$$

Al igual que la declinación solar puede ser aproximada por

$$\delta = 23.45 \cdot \text{Sin} \left[ \frac{360}{365} (d + 284) \right] \quad (16)$$

Un método propuesto por Black (1956) para estimar el coeficiente  $K_R$ , como una función de la temperatura, está dado por (Black et al, 1956)

$$K_R(C) = 0.803 - 0.340 \cdot C - 0.458 \cdot C^2 \quad (17)$$

Donde  $C$  es la cobertura de nubes, donde 0 indica cielo despejado y 1 indica cielo totalmente cubierto, pero no se indica el tipo de nubosidad. Adicionalmente, a partir de datos medios mensuales de 65 estaciones meteorológicas en USA, ubicadas entre los 7 y 50 grados de latitud norte, se encontró la siguiente relación para la ecuación 18 (Knapp et al., 1980)

$$K_R(\Delta T) = 0.0018 \cdot \Delta T^2 - 0.0433 \cdot \Delta T + 0.4023 \quad (18)$$

Donde  $\Delta T$  corresponde a la diferencia entre las temperatura máxima y mínima diaria. La ecuación de Penman–Monteith (Allen et al 1989; Allen et al, 1998; Allen et al, 2006) es usada como una referencia a nivel mundial para el cálculo de  $ETo$  (Ventura et al., 1999).

La Figura 5 muestra el generador climático implementado en visual basic para aplicaciones Excel (VBA), primeramente para asegurar la portabilidad del código a cualquier fuente, pero además abierto para realizar modificaciones con mucha facilidad para nuevas versiones. Lo interesante de este enfoque, es que esta herramienta (VBA) se encuentra en la mayoría de los computadores personales de empresas y usuarios, por ello puede ser fácilmente implementado para cualquier usuario.

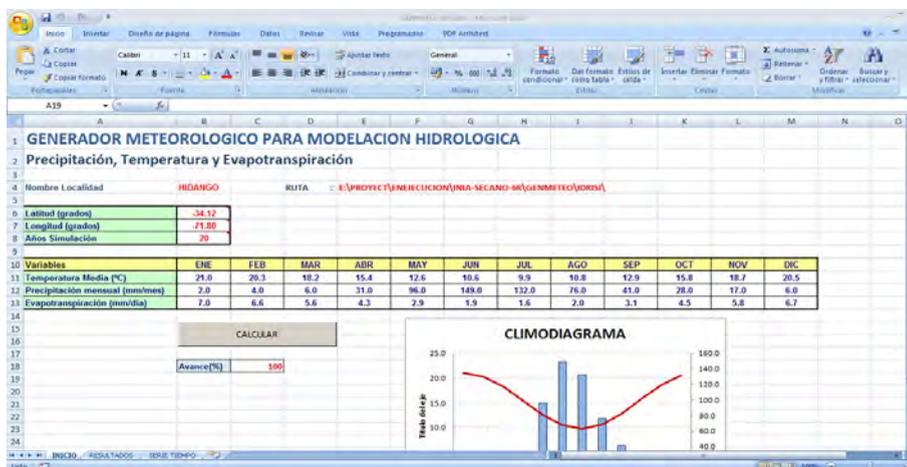


Figura 5. Implementación computacional en una planilla Excel utilizando código VBA.

## 2.3 REFERENCIAS

ACOCK, B. & ACOCK, M.C (1991). Potentials for using long-term field research data to develop and validate crop simulation. *Agronomy Journal* 83, 56—61.

ALLEN, R.G., M.E. JENSEN, J.L. WRIGHT, AND R.D. BURMAN. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal* 81: 650-662.

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PERRIER, A. & PEREIRA, L.S. (1994). An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.* Vol. 43, No. 2, 1-34.

ALLEN, R.G., PERIERA, L.S., RAES, D., SMITH, M. (1998) *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements, Irrigation and Drainage Paper No. 56.* FAO, Rome, Italy, p. 300.

ALLEN, R. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology* 229(1-2): 27-41.

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; WRIGHT, J.L.; HOWELL, T.A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; YRISARRY, J.B.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; PERRIER, A.; ALVES, I.; WALTER, I. &

- ELLIOTT, R. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, No. 81, 1-22.
- BEZERRA, F.M.L.; OLIVEIRA, C.H.C. (1999). Evapotranspiração máxima e coeficientes de cultura para o milho em Fortaleza, CE. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.19, n.1, p.8-17.
- BLACK J. N. (1956). The distribution of solar radiation over the Earth's surface. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.* 7, 165-189, 1956.
- BOND, D. C. (1979) Generating daily weather values by computer simulation techniques for crop yield forecasting models. Washington D. C. Research Division, SRS, USDA, USA.
- BOWEN, I.S. (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 2<sup>nd</sup> series 26(6), 779-787.
- BRUHN, J. A., W. E. FRY y G. W. FICK. (1980) Simulation of daily weather data using probability distributions. *J. of Applied Meteorology*.
- BRISTOW, R. L. AND CAMPBELL, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agriculture and Forestry Meteorology*, 31:159-166.
- BRUTSAERT, W. (1982). *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. Kluwer, Boston, p. 299.
- BURDEN, R.L., FAIRES, J.D. (1985). *Análisis Numérico*, Grupo Editorial Iberoamericano.
- CAMPOS D., F. (2005). Estimación empírica de la ETP en la república mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México* 20 (3): 99-110.
- CAMPBELL, G. (1985). *Transport Models for Soil-Plant Systems*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- CAMPBELL, G. S. AND DIAZ, R. (1988). *Simplified Soil-Water Balance Models to Predict Crop Transpiration*. ICRISAT, Patancheru, India. Bidinger, F. R. and Johnson, C. (eds.).

CASTILLO, H., SANTIBÁÑEZ, F. (1981). Evaluación de la radiación solar global y luminosidad en Chile I. Calibración de fórmulas para estimar radiación solar global diaria. *Agricultura Técnica* 41, 145–152.

CIREN. 2010. Determinación de la erosión actual y potencial en los suelos de Chile: Región del Maule, Síntesis de resultados (<http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/bdirenci/index/assoc/HASH01a3.dir/PC14710.pdf>).

DROOGERS P. AND R.G. ALLEN. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, Volume 16, Issue 1, Pages 33 – 45 doi:10.1023/A:1015508322413

GABRIEL, K. AND NEUMANN, J. (1962). A Markov chain model for rainfall occurrence at Tel-Aviv. *Quart. J. R. met. Soc.*, 88:90–95.

GENG, S., F.W.T. Penning de Vries, and I. Supit (1986) A simple method for generating daily rainfall data, *Agric. Forest Meteorol.* 36:363-376.

HARGREAVES, G., SAMANI, Z. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE.* 108, 225–230.

HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.

HARGREAVES, G.H. (1989) Accuracy of estimated reference crop evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 115(6), 1000-1007.

HARGREAVES G.H., ALLEN R.G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(1): 53-63.

IRMARK, S., D.Z. HAMAN, AND J. W. JONES. (2002). Evaluation of Class A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 128:153-159.

JENSEN, M.E., BURMAN, R.D., ALLEN, R.G. (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices* No. 70, p. 352.

JENSEN D.T., HARGREAVES GH, TEMESGEN B, ALLEN RG. (1997). Computation of ETo under non ideal conditions. *J Irrig Drain Eng* 123(5):394–400.

KNAPP, C.L., T.L. STOFFEL AND S.D. WHITAKER. (1980). *Insulation Solar Radiation Manual*. Solar Energy Research Institute. Golden CO. 281 p.

LINCOLN ZOTARELLI, MICHAEL D. DUKES, CONSUELO C. ROMERO, KATI W. MIGLIACCIO, AND KELLY T. MORGAN. *Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration* (<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/ae/ae45900.pdf>).

MAYAUX P., STRAHLER A., EVA H., HEROLD M., SHEFALI A., NAUMOV S., DORADO A., DI BELLA C., JOHANSSON D., ORDOYNE C., KOPIN I., BOSCHETTI L. AND BELWARD. A. (2006). Validation of the Global Land Cover 2000 Map (2006). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44: 1728-1739.

MONTEITH, J.L. (1965). *Evaporation and environment*, In: *Proceedings of the 19th Symposium of the Society for Experimental Biology*. Cambridge University Press, New York, NY pp. 205–233.

MONTEITH, J.L., UNSWORTH, M.H. (1990). *Principles of Environmental Physics*, second ed. Edward Arnold, London, p. 291.

NICKS, A.D. (1974). Stochastic Generation of the Occurrence, Pattern and Location of Maximum Amount of Daily Rainfall. *Proc. Symp. on Statistical Hydrology*, USDA, ARS, Misc. Pub., 1275:154-176.

NICKS, A.D. and J. F. HARP (1980). Stochastic generation of temperature and solar radiation data. *J. of Hidrology* 48:1-17.

NOVOA S. A., R.; VILLASECA C., S.; DEL CANTO S., P; ROUANET M., J. L.; SIERRA B. C; DEL POZO L. A. (1989). *Mapa Agroclimático de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Ministerio de Agricultura, 221 páginas.

PARRA, J. C. Y MORALES, L. J. (1994). El lugar de presión máxima en Chile y la evolución temporal de algunas variables climáticas en Concepción. *Actas III Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra*, Chile.

PENMAN, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society, London A* 193, 120–146.

PEREIRA, L.S., PERRIER, A., ALLEN, R.G., ALVES, I. (1999). Evapotranspiration: Review of concepts and future trends. *J. Irrig. Drain. Engng.* 125(2): 45-51.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD)-GOBIERNO DE CHILE. (1964). *Proyecto Hidrometeorológico*. Climatología en

Chile. Fascículo I. Valores normales de 36 estaciones seleccionadas. Período 1916-1945. s.e. Santiago de Chile. s.p.

PRIESTLEY, C.H.B. (1959). Turbulent transfer in the lower atmosphere. University of Chicago Press, Chicago, IL.

PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100, 81–92.

PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100, 81–92.

REDA, IBRAHIM AND AFSHIN ANDREAS. (2004). Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. *Solar Energy*, 76: 577–589.

RICHARDSON, C.W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resour. Res.* 17:182\_190.

RICHARDSON, C. W., (1982). Dependence structure of daily temperature and solar radiation. *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.*, 25:735–739.

RICHARDSON, C. W., AND D. A. WRIGHT (1984). WGEN: A model for generating daily weather variables. USDA Publication ARS-8, 83 pp. [Available from National Technical Information Center, 5285 Port Royal Rd., Springfield, VA 22161.]

SAAVEDRA, N. (1985). Modelo climático simple para Concepción. *GEOACTA*. 13, 13-26 p.

SAAVEDRA, N. Y FOPPIANO, A. (1992a). Contribución a la cinemática del anticiclón del pacífico sur. *GEOACTA*. 19, 95-110 p.

SAAVEDRA, N. Y FOPPIANO, A. (1992b). Modelo empírico de un descriptor climático para la región central de Chile. *GEOACTA*. 19, 155-165 p.

SAAVEDRA, N. Y FOPPIANO, A. (1992c). Monthly mean pressure model for Chile. *International Journal of Climatology*. 12, 469-480 p.

SAMANI, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data . *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 265-267.

SILVA, G. M. y MANSILLA, M. A. (1993) Análisis de sistemas en Producción Ani-

mal. Teoría y aplicaciones. Fac. Cs. Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. 260 p.

SELKER, J. S. AND D.A. HAITH (1990) Development and testing of single parameter precipitation distributions. *Water Resour. Res.* 26:2773-2740.

STÖCKLE C.O. (1989). Simulation models in agriculture: From cellular level to field scale. Proceedings of the 1989 Summer Computer Simulation Conference, Austin, Texas, 24-27 July.

STÖCKLE, C. AND CAMPBELL, G. (1989). Simulation of crop response to water and nitrogen: An example using spring wheat. *Transactions of the ASAE*, pages 66-68.

STÖCKLE, C., MARTIN, S., AND CAMPBELL, G. (1992). A model to assess environmental impact of cropping systems. *Amer. Soc. of Agr. Eng.*, 92(2041).

STÖCKLE, C.O., G.S. CAMPBELL, AND R. NELSON (1999). *ClimGen manual*. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA.

SUPIT, I., HOOIJER, A.A., VAN DIEPEN, C.A., EDTS. (1994). System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Volume 1: Theory and Algorithms. EUR Publication N° 15959 EN of the Office for Official Publications of the EC. Luxembourg, 146 pp.

SUPIT, I., KAPPEL, R.R. VAN. (1998). A simple method to estimate global radiation. *Solar Energy*, 63:147-160.

TODOROVIC, P. AND WOOLHISER, D. A. (1975). A stochastic model of n-day precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 14:17-24.

TRAJKOVIC, S. (2007). Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *J. Irrig. Drain Eng.* 133(1): 38-42.

TYAGI, N., D. SHARMA AND S. LUTHRA. (2000). Evapotranspiration and crop coefficients of wheat and sorghum. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4): 215-222.

USGS. (2004). Shuttle radar topography mission, 3 Arc Second scene. Unfilled Unfinished 2.0. Global Land Cover Facility. Febrero 2000. University of Maryland, College Park, Maryland, USA.

VENTURA, F., D. SPANO, P. DUCE, AND R.L. SNYDERE. (1999). An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrigation Science* 18:163-170.

WEIBULL, W. (1951) A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, 18:293-302.

WILKS, D. AND WILBY, R. (1999). The weather generation game: A review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23(3):329–357.

WITTAKER M. (1943). *Barografía de Chile*. Publicación No. 58. Oficina Meteorológica de Chile, Santiago, Chile.



# Capítulo 3

## CLASIFICACIÓN DE USO DE SUELOS DEL SECANO DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS

### **Autor:**

Marión Espinosa T.  
Ing. Agrónomo Ms. Ing. y  
Gestión Ambiental  
Centro de Información de  
Recursos Naturales  
CIREN



### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La clasificación del uso de la tierra es una de las aplicaciones más extendidas de los sensores remotos. Existen numerosos antecedentes del uso de estas herramientas para la clasificación de áreas agrícolas y para la discriminación de cultivos y por tanto, el conocimiento de la superficie que ocupa cada uno de ellos, por tratarse de una información continua de la superficie terrestre.

La discriminación de los distintos usos del suelo en la data satelital, se basa en la diferente respuesta espectral que tienen los distintos componentes que se pueden encontrar en la superficie del suelo. Para esto se utilizan técnicas de interpretación digital, gracias al uso de computadoras y de modelos estadísticos multivariados. El producto final de este tipo de análisis es uno o más mapas, aislados o integrados en un “Sistema de Información Geográfica” (SIG). Puede ocurrir que para una fecha en particular existan dos o más tipos de cultivos que tengan una respuesta espectral similar y por lo tanto, son difíciles de separar utilizando sensores multispectrales. Para resolver esta situación se utiliza el conocimiento del estado fenológico de los cultivos, imágenes satelitales de distintas fechas para la misma temporada de crecimiento y/o se simplifica la alta dimensionalidad espectral utilizando índices espectrales de vegetación.

En Abril del 2012, CIREN firma contrato con el Instituto de Investigaciones Agropecuarias –INIA– para la identificación del uso actual de suelo para 10 Comunas del secano de la Región del Libertador Bernardo O’Higgins. En este marco descrito, el presente documento contiene el detalle de la metodología utilizada y los resultados obtenidos.

Un mapa general del uso de suelo, a escala 1:50.000 se encuentra en: [ide.minagri.gob.cl](http://ide.minagri.gob.cl).

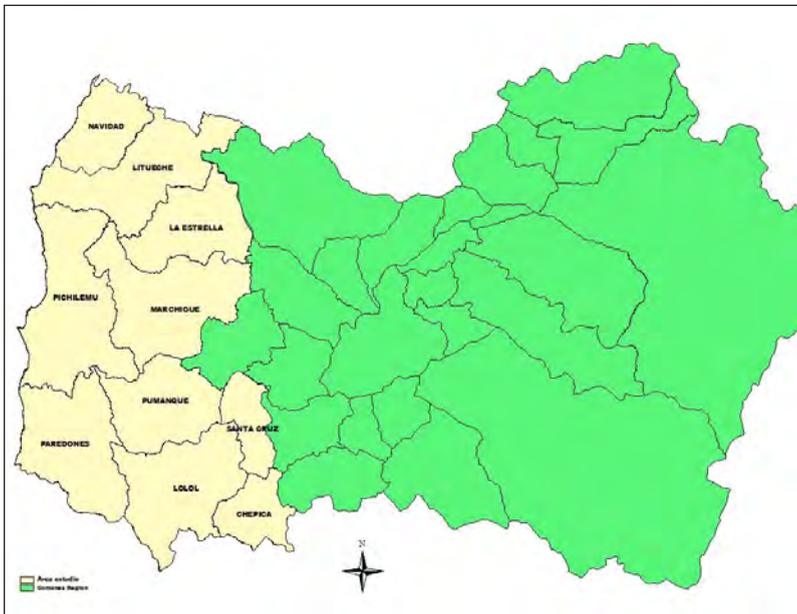
### **3.2 ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio consideró el secano de la Región del Libertador Bernardo O’Higgins, de 10 Comunas pertenecientes a las Provincias de Colchagua y Cardenal Caro, abarcando una superficie total de 477.680,06 hectáreas, como se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Provincias, Comunas y Superficie Área de Estudio.

PROVINCIA	COMUNA	HECTAREAS
CARDENAL CARO	PICHILEMU	71.687,87
CARDENAL CARO	LITUECHE	62.378,61
CARDENAL CARO	PAREDONES	59.336,82
COLCHAGUA	SANTA CRUZ	19.209,93
CARDENAL CARO	MARCHIGUE	65.960,93
CARDENAL CARO	LA ESTRELLA	43.250,75
COLCHAGUA	CHEPICA	21.844,45
CARDENAL CARO	NAVIDAD	30.143,93
COLCHAGUA	PUMANQUE	44.181,76
COLCHAGUA	LOLOL	59.685,01
<b>TOTAL</b>		<b>477.680,06</b>

En la Figura 1 se presenta la distribución espacial en la Región, de las comunas del área de estudio.

**Figura 1.** Comunas del área de estudio del secano de la región de O'Higgins.

Las clases de uso consideradas fueron las siguientes:

- Cuerpos de Agua (lagos, lagunas, embalses, ríos).
- Uso Urbano
- Uso industrial
- Bosque (Renoval, hoja caduca y perenne, pino, álamo, eucaliptus)
- Roca
- Praderas Anuales (Naturales) y Artificiales
- Espinales
- Frutales
- Parronales y Viñas
- Chacras, cereales y hortalizas
- Terrenos en barbecho

### **3.3 ACTIVIDADES REALIZADAS**

En esta sección se resumen las actividades realizadas para llevar a cabo la clasificación de uso de suelos.

#### ***3.3.1 Recopilación, Análisis, Compilación e Integración de Información***

3.1.1 Recopilación y análisis de información

3.1.2 Compilación e integración de la información al SIG

La información geoespacializada de uso del suelo que existe para el secano de la Región de O'Higgins es poca, básicamente la siguiente:

- Catastro de vegetación nativa de CONAF (2005)
- Catastro Frutícola de CIREN (2009)
- Plantaciones Forestales INFOR (2010)
- Parronales y viñas SAG (2009)

Existe también información que no está espacializada correspondiente a la del Censo Agropecuario del 2007. Para este censo existe información vectorial correspondiente a los límites de los distritos censales, en formato shape y, en tablas de datos (planillas excell) la información por rubro (cereales, forrajeras, frutales, etc), por lo cual se trabajó en la conversión de las tablas a bases de datos, para espacializar esa información al distrito censal, la cual es la unidad más pequeña que se puede llegar con la información del Censo Agropecuario.

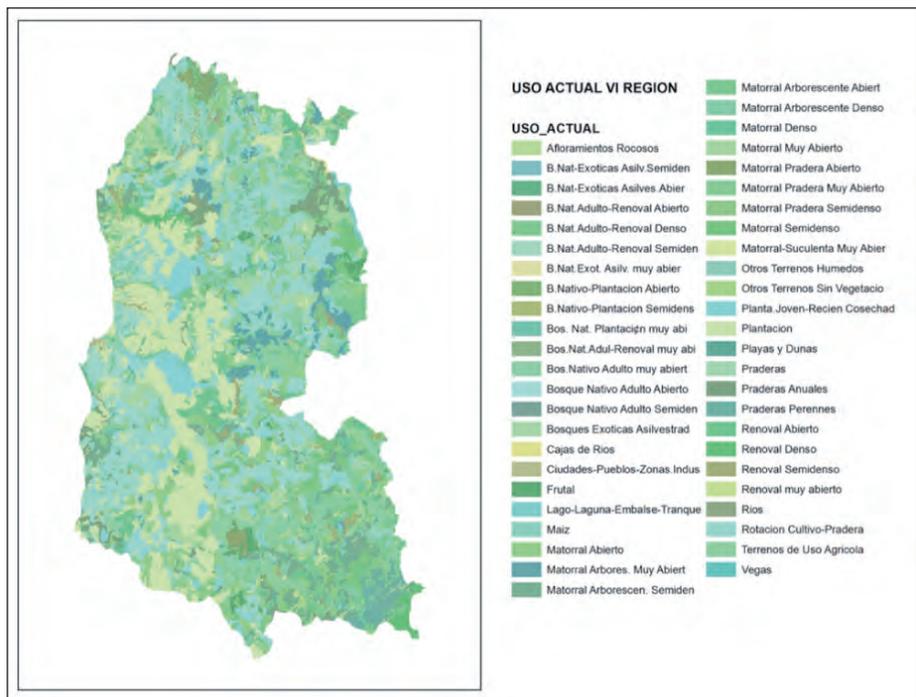
Los datos recopilados fueron compilados estandarizados e ingresados al SIG prelimi-

nar. Los datos geodésicos con los cuales se trabajó corresponden a la proyección UTM Datum WGS84, Huso 19.

Finalmente, a partir de los datos recopilados, se generó una cartografía base del uso de la tierra. El supuesto es que las grandes categorías de uso en el secano no cambian mayormente, principalmente por las limitaciones hídricas, por lo cual, esta cobertura sirve para apoyar el análisis visual y las clasificaciones de la data satelital.

Una vez procesada la cobertura base integrada de uso actual, se lleva a cabo el ajuste cartográfico de los límites de las diferentes unidades descritas sobre las imágenes Landsat, logrando un buen calce de la información lo que permitió, una buena discriminación del área agrícola versus las áreas naturales.

De esta forma, la cartografía integrada de uso de suelos queda compuesta por el catastro de bosque nativo, catastro frutícola y plantaciones forestales. Esta cartografía da cuenta de la falta de información del área agrícola por lo cual, el trabajo se concentra en estas áreas.



**Figura 2.** Cartografía base integrada de uso de suelo (veg. Nativa + plantaciones frutales y forestales).

Respecto de la actividad frutícola, se tiene un buen nivel de detalle proporcionado por el catastro frutícola, que cuantifica los huertos frutales comerciales pero sólo incluye las vides de mesa y excluye las vides de uso vitícola.

### 3.3.2 Definición Metodológica de Obtención del Uso Actual del Suelo

La metodología para la determinación del uso actual se basó en el análisis de imágenes satelitales a través de distintos algoritmos de clasificación digital, supervisada y no supervisada, como también del análisis multicriterio de índices vegetacionales, topografía, clima y suelo.

En el diagrama de la Figura 3 se presenta el esquema del desarrollo metodológico.

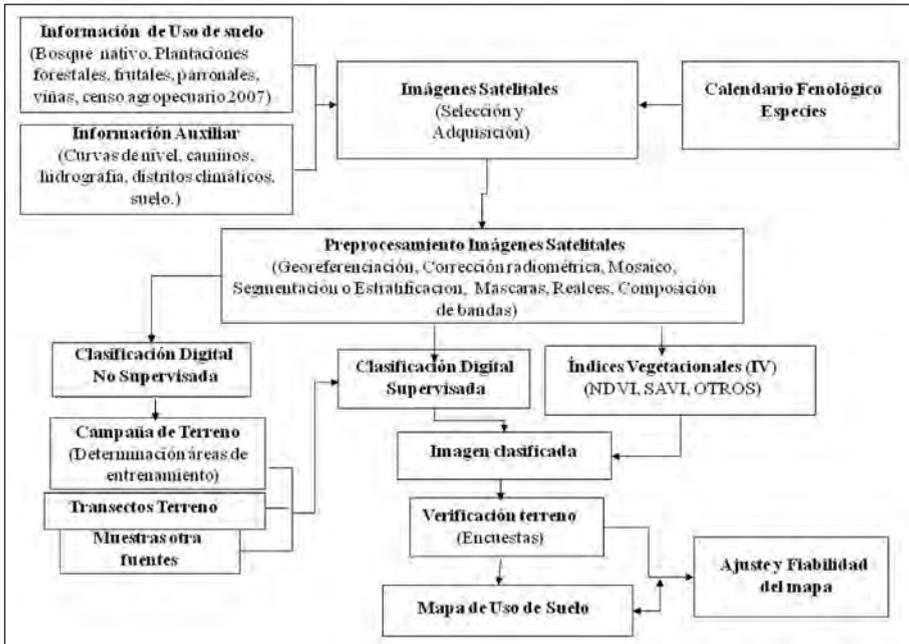


Figura 3. Diagrama metodológico para obtención de uso actual.

### 3.3.3 Calendarización de Estados Fenológicos

Esta actividad consideró por una parte, la recopilación de información de fenología de cultivos del área (cultivos herbáceos, leñosos, bosque, otros) y la calendarización por tipo de uso silvoagropecuario.



### **3.3.4 Selección y Adquisición de Imágenes Satelitales**

#### **3.3.4.1 Recopilación imágenes existentes**

Se recopiló la data satelital existente en CIREN para el área de estudio, correspondiente por una parte al mosaico de febrero del 2008 utilizado en el proyecto Erosión Nacional. También se recopilaron, para el área de estudio, las franjas de datos originales Quickbird, con todas sus bandas, correspondientes en su mayoría a data del año 2006 y que fueron utilizados para la creación de las ortoimágenes de la Región de O'Higgins.

Para complementar los datos existentes se bajaron de la web data satelital LANDSAT TM, de libre disposición, que cumplen los parámetros adecuados para determinación de uso de suelo. Las fechas de las imágenes son las siguientes:

- 27 noviembre 2009
- 30 enero 2010
- 23 abril 2011
- 29 agosto 2011
- 17 noviembre 2011
- Mayo 2013

### **3.3.5 Preprocesamiento de Imágenes Satelitales**

#### **3.3.5.1 Correcciones geométricas y radiométricas**

Las imágenes satelitales fueron remuestreadas desde una resolución espacial de 30x30 metros a píxeles de 25x25 metros, con el objeto de aumentar la resolución espacial. Se extrajo la banda 6 (termal) por tener otra resolución espacial (120 metros).

Las imágenes fueron corregidas geoméricamente y ortorectificadas a través del uso de puntos de control obtenidos desde imágenes Landsat TM ortorectificadas del año 1987. Se utilizaron puntos de control aplicándose el método de rectificación de Convulsión Cúbica, que considera los Niveles Digitales (ND) de los 16 píxeles más próximos (Chuvieco, 1996). Para respaldar la corrección geométrica se utilizó el DEM ASTER disponible en forma gratuita en la web.

### 3.3.5.2 *Elaboración de mosaicos de imágenes*

Estos se realizaron con las imágenes Quickbird, debido a que el área de estudio queda cubierta por sólo una imagen LANDSAT.

### 3.3.6 *Generación de Cartografía de Cobertura y Uso Actual*

#### 3.3.6.1 *Definición escala de trabajo y leyenda*

De acuerdo a los términos de referencia, la escala general de trabajo es 1:50.000, sin embargo algunos sectores se trabajaron escalas 1:10.000 con el apoyo de imágenes Quickbird.

Las clases temáticas mínimas consideradas fueron las siguientes:

- Cuerpos de Agua (lagos, lagunas, embalses, ríos).
- Uso Urbano
- Uso industrial
- Bosque (Renoval, hoja caduca y perenne, pino, álamo, eucaliptus)
- Roca
- Praderas Anuales (Naturales) y Artificiales
- Espinales
- Frutales
- Parronales y Viñas
- Chacras, cereales y hortalizas
- Terrenos en barbecho

#### 3.3.6.2 *Procesamiento digital e interpretación visual*

Con la finalidad de simplificar el análisis posterior, se optó por diferenciar los terrenos planos de los terrenos con pendientes basándose en el tipo de uso que se les da. Los terrenos planos tienen una vocación preferentemente agrícola, a diferencia de los terrenos con pendientes que están ocupados principalmente por plantaciones forestales y vegetación natural.

Por la razón anterior y dado que se contaba con datos de uso del área, se construyó una base geomorfológica, a partir de la cartografía de pendientes para la zona de estudio. Como plano se consideró a todos los terrenos con pendiente menor o igual a 15% (figura 4). Para su construcción se utilizó también, el estudio agrológico para excluir los cuerpos de agua y las zonas urbano-industriales.

De acuerdo a la metodología, se aislaron las clases correspondientes al área agrícola, rotación de cultivo y praderas del resto de la imagen y se dejaron los otros identifi-

cados en el Catastro de Bosque nativo de CONAF con valor cero (color negro en las imágenes).

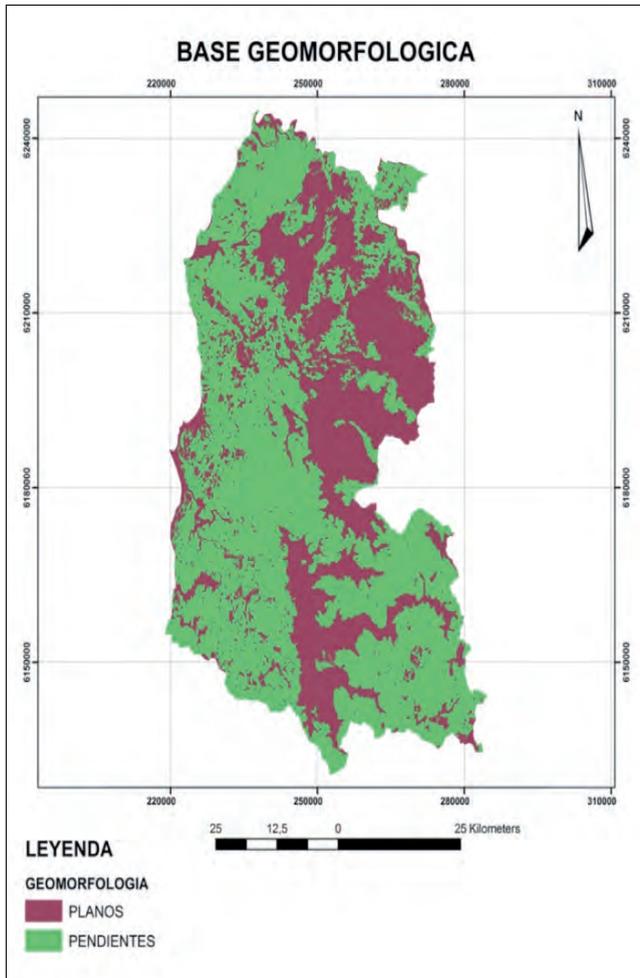
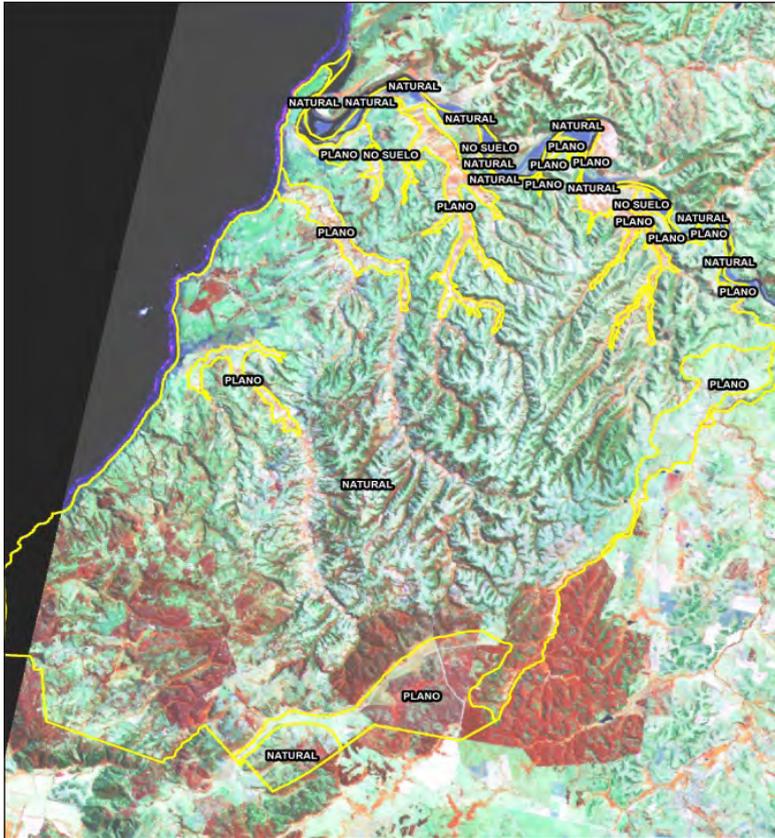


Figura 4. Base geomorfológica.

Del objetivo de extracción de la subescena de pendientes altas, se aplicó la máscara para las pendientes sobre el 15%. Este procedimiento fue ejecutado, dado que se necesitaba clasificar solo los usos de suelo bajo este criterio, pero también, de la necesidad de que la información restante, es decir, las pendientes bajo el 15% (pendientes bajas), contaran con valores 0. De esta manera se aplicó una máscara y no un corte o subset,



En la figura 5 se visualiza en la imagen los sectores del área de estudio con pendientes mayores al 15%. Se realizó este mismo proceso para los sectores planos. Posteriormente ambos sectores fueron clasificados digitalmente (supervisada y no supervisada), por separado para cada tipo de pendiente (plano o montes).



**Figura 6.** Base geomorfológica comuna de Navidad.

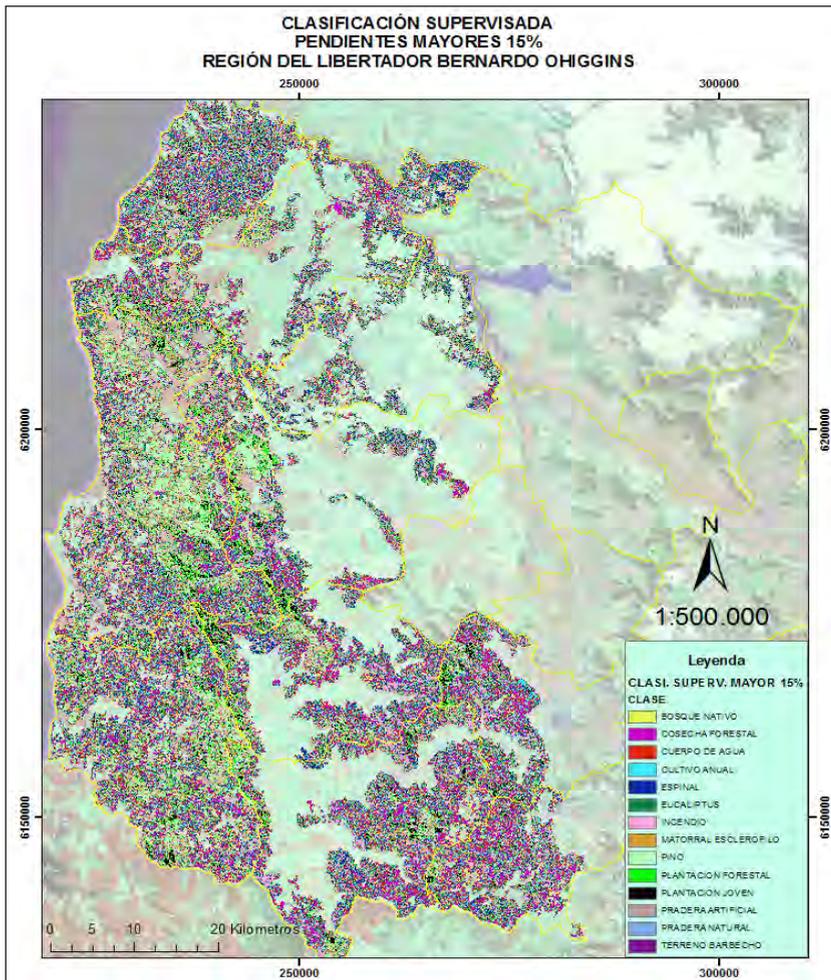
Se realizó un análisis preliminar para la comuna de Navidad, a través de clasificaciones no supervisadas, utilizando las 6 bandas del Landsat y comparando estos resultados utilizando solo las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano. Los resultados no indicaron mayores diferencias por lo que posteriormente el análisis se realizó con todas las bandas disponibles.

Los resultados obtenidos para la comuna de Navidad se presentan en las figuras 7, 8, 9 y 10.



se recopilaron en una primera fase. Se consideraron también los siguientes aspectos: i) posibles diferencias de comportamiento para un mismo cultivo en distintas zonas; ii) que el cultivo sea dominante en la zona considerada; iii) tamaño de las parcelas apropiados para una fácil identificación en las imágenes.

Para la clasificación supervisada de la imagen para pendientes mayores al 15% (Figura 11) se definieron 3 muestras por cada clase, las que fueron definidas utilizando la información del Catastro de Vegetación Nativa (CONAF) y del catastro de plantaciones forestales (INFOR).



**Figura 11.** Clasificación supervisada para pendientes mayores al 15%.

Cabe señalar que previamente se usó un NDVI (Índice de Vegetación Normalizada) para discriminar dentro de la subescena la información exclusiva de vegetación, para así evitar confusiones respecto de otras coberturas (suelo desnudo, incendios, sombras, etc.). De esta manera, se clasificó por separado la vegetación del resto de las coberturas dentro de la subescena de pendientes altas.

Por su parte, las clases resultantes de la clasificación supervisada del área agrícola fueron asignadas utilizando información auxiliar de apoyo correspondiente principalmente a los datos de distritos censales y del catastro frutícola de CIREN (figura 12).

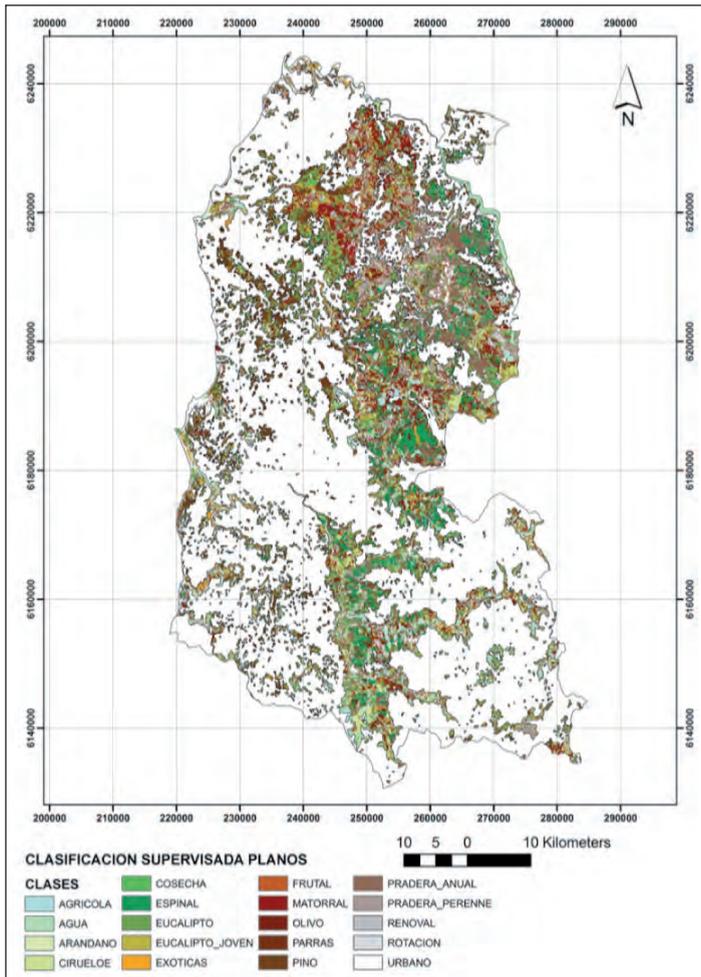


Figura 12. Clasificación supervisada sectores planos del área de estudio.

Posteriormente ambas clasificaciones se unieron mediante una suma, obteniéndose así 14 clases temáticas correspondientes.

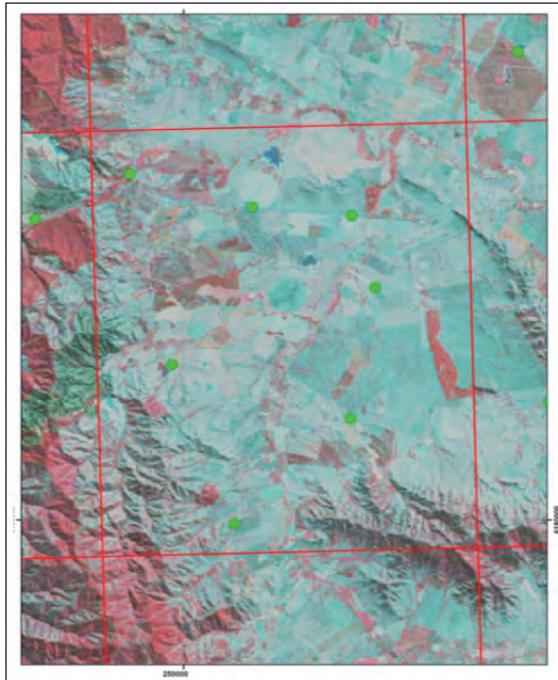
Las clases resultantes fueron revisadas en terreno y se determinaron las áreas de entrenamiento con las cuales se apoyó la nueva clasificación supervisada de las imágenes.

### 3.3.6.3 Campaña de Terreno (Determinación de patrones espectrales y/o parcelas de entrenamiento)

Se realizó una campaña de terreno con la finalidad de validar la información generada en la actividad anterior descrita, realizar el ajuste de las distintas clases de uso de tierras además de identificar patrones espectrales.

La cartografía de terreno fue organizada por cartas, a escala 1:25.000 que cubrieron toda el área de estudio.

Se hicieron dos set de cartografía, una contenía la imagen Landsat de fondo, en composición RGB falso color 4 3 2 (figura 13). El otro set contenía las cartas, a esta misma escala, con la clasificación supervisada realizada.



**Figura 13.** Cartas de terreno con fondo imagen, composición RGB 432.

La toma de datos en terreno se realizó, primero, identificando las principales rutas y caminos y a partir de ello, se diseñaron recorridos que cubrieran el máximo de la heterogeneidad de clases temáticas en la imagen que generalmente coincidía con las dos diagonales y mediatrices de la imagen. Sobre esos recorridos se tomaron los puntos de muestreo. A cada punto muestral (en color verde en la imagen) se registró sus coordenadas las que fueron tomadas con navegador GPS. Cada punto podía contener más de una observación.

Se diseñó una planilla para la toma de datos en terreno que consideró lo siguiente:

- Fecha
- Ubicación (coordenadas)
- Uso actual y especie
- Estado fenológico observado
- Uso del año correspondiente a la imagen.
- Superficie aproximada.
- Ubicación administrativa.
- Identificación del encuestado.

En terreno, se registraron muestras representativas de las distintas clases temáticas presentes en la clasificación supervisada y al mismo tiempo se compararon los resultados de la clasificación con los datos obtenidos en terreno.

Posteriormente en gabinete, se digitalizó la información de terreno y fue traspasada a formato shape. La base de datos asociada contiene los siguientes campos:

- Uso actual en terreno.
- Especie.
- Estado fenológico.
- Uso en la imagen.
- Uso según la clasificación supervisada.
- Fotografía n°
- Observaciones

Estos campos se repiten en A, B, C, D, E en la medida que existan más observaciones (Figura 14).

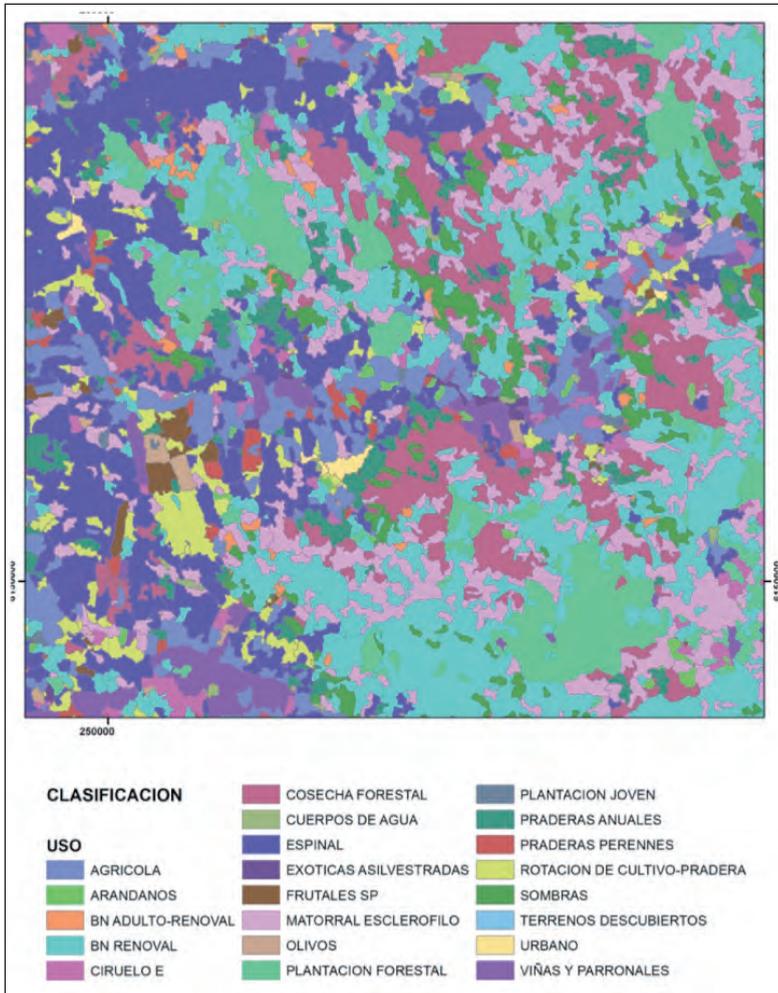
**Tabla 3.** Base de datos asociada a los puntos de terreno.

ID	USO_A	ESPECIE_A	FENOLOGIA_A	IMAGEN_A	CLASIF_SUPERV_A
1	ESPINAL	ESPINO	SIN HOJAS	MATORRAL	AGRICOLA/PARRONAL-VIÑA
2	PRADERA ANUAL NATURAL				
3	MATORRAL ESCLEROFILO			MATORRAL DENSO	MATORRAL
4	AGRICOLA	MAIZ/TRIGO		AGRICOLA	AGRICOLA
5	ESPINAL / PRADERA ANUAL	ESPINO ABIERTO		MATORRAL PRADERA	ROTACION
6	ROTACION CULTIVO-PRADERA		3 A 4 HOJAS	PRE SIEMBRA CULTIVO	4 MUESTRAS
7	FRUTAL OLIVO	OLIVO	4 ADOS	AGRICOLA	OLIVO
8	ROTACION CULTIVO-PRADERA	BALLICA	3 A 4 HOJAS	PRADERA	AGRICOLA
9	ROTACION CULTIVO-PRADERA		FLORACION	PRADERA ANUAL	PRESIEMBRA
10	PLANTACION FORESTAL	PINO	1 A 2 ADOS	PLANTACION JOVEN	TODO COMO PRADERA
11	PLANTACION FORESTAL	PINO	8 A 10 ADOS	PLANTACION	PLANTACION FORESTAL
12	ROTACION CULTIVO-PRADERA			PRADERA	PRADERA ANUAL
13	PLANTACION FORESTAL	PINO	ADULTO E M APROX	OK	FORESTAL
14	FRUTAL OLIVO	OLIVO	3 ADOS APROX		AGRICOLA
15	ROTACION CULTIVO-PRADERA	TRIGO	4 HOJAS	AGRICOLA	AGRICOLA RIEGO POR PIVOT
16	FRUTAL GENERICO	GENERO PRUNUS	7 ADOS	AGRICOLA	FRUTICOLA
17	ROTACION CULTIVO-PRADERA	CEREAL	4 HOJAS	PRADERA	PLANTACION JOVEN - MATORR

### 3.3.6.4 Cartografía final y validación de resultados

Con las muestras de terreno y considerando los resultados de terreno, se realizó una nueva clasificación supervisada, que fue corregida y validada con la información de terreno que no se ocupó para la clasificación.

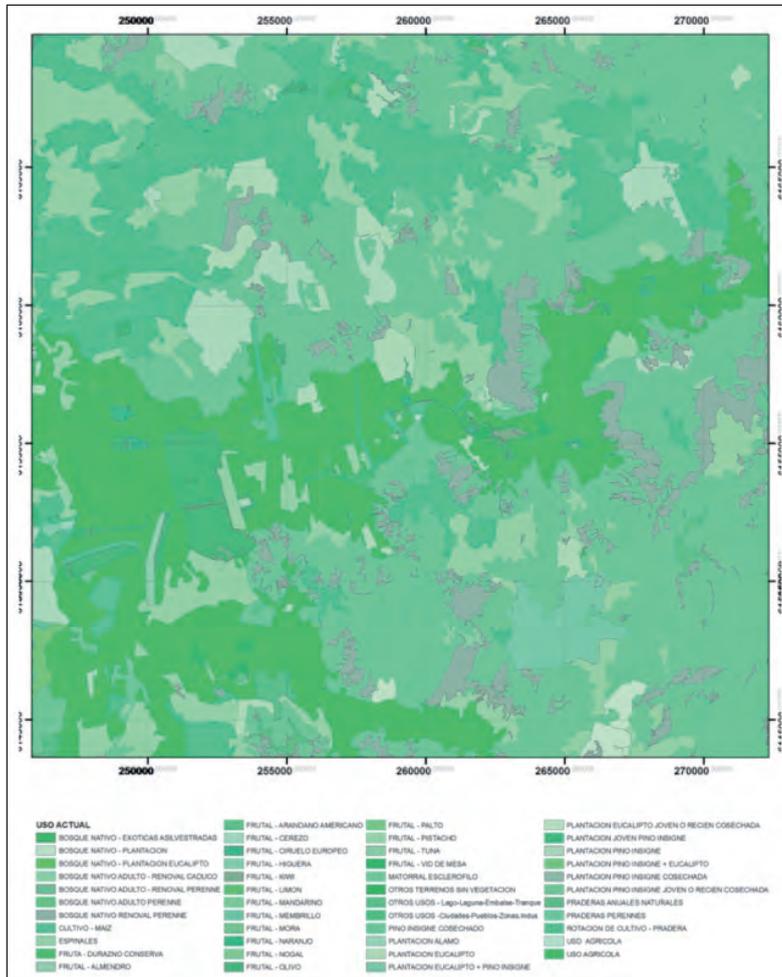
En la figura 14 se presenta la clasificación supervisada de la imagen Landsat, realizada a un sector del área de estudio. En la figura 15, para el mismo sector, se presenta la clasificación corregida.



**Figura 14.** Clasificación supervisada imagen Landsat.

El resultado de esta clasificación es una cartografía temática de uso de suelo, detallada para la zona agrícola, en formato raster.

La calibración de los modelos y evaluación del mapa de uso obtenido fué validado por dos vías: la primera utilizando información de parcelas de control correspondientes a la información entregada por INIA en Octubre del 2012, que fué levantada en las distintas áreas de identificación de proyectos, además de parcelas de transecto y encuestas mediante chequeo en terreno.



**Figura 15.** Clasificación de uso actual a partir de correcciones de la clasificación de imagen.

Una vez obtenida la cartografía temática de uso de suelos, para el área agrícola, se procedió a unirla con la cobertura de vegetación natural (pendientes mayores a 15%), ambas en formato raster. Posteriormente se realizó el proceso de filtrado, vectorización y suavizado de la cobertura.

La cobertura, por venir de un formato raster esta codificada con tantos números como clases existan por lo que se procede a la descripción de dicho código y la estandarización de la leyenda. A partir de las imágenes clasificadas y validadas, se elaboran los mapas de distribución espacial de los usos de la tierra presentes por comuna.



**Tabla 4.** Categoría Uso Actual.

<p><b>PLANTACIONES FORESTALES</b>                  EUCALIPTOS                  PINO                  PLANTACION EXOTICAS ASILVESTRADAS                  PLANTACION FORESTAL                  PLANTACION JOVEN O RECIEN COSECHADA</p> <p><b>PRADERAS Y MATORRALES</b>                  ESPINAL                  MATORRAL ABIERTO                  MATORRAL ARBORESCENTE                  MATORRAL ARBORESCENTE ABIERTO                  MATORRAL ARBORESCENTE DENSO                  MATORRAL ARBORESCENTE MUY ABIERTO                  MATORRAL ARBORESCENTE SEMIDENSO                  MATORRAL DENSO                  MATORRAL ESCLEROFILO                  MATORRAL MUY ABIERTO                  MATORRAL PRADERA ABIERTO                  MATORRAL PRADERA MUY ABIERTO                  MATORRAL SEMIDENSO                  MATORRAL SUCULENTAS MUY ABIERTO                  PRADERA MANEJADA O ARTIFICIAL                  PRADERA NATURAL                  PRADERAS ANUALES                  PRADERAS PERENNES</p> <p><b>TERRENOS AGRICOLAS</b>  <b>FRUTALES</b>                  ALMENDRO                  ARANDANO AMERICANO                  CEREAL                  CEREZO                  CHACRAS Y HORTALIZAS                  CIRUELO                  CIRUELO EUROPEO                  CULTIVO ANUAL                  DURAZNERO CONSUMO FRESCO                  DURAZNERO TIPO CONSERVERO                  FRAMBUESA                  FRUTAL                  FRUTILLAS                  HIGUERA                  KIWI                  LIMONERO                  MANDARINO                  MEMBRILLO                  MORAS CULTIVADAS E HIBRIDOS                  NARANJO                  NECTARINO                  NOGAL                  OLIVOS</p>	<p>PALTO                  PISTACHO                  RASTROJO                  ROTACION CULTIVO PRADERA                  TERRENOS EN BARBECHO                  TUNA                  VID DE MESA                  VIÑAS Y PARRONALES</p> <p><b>CULTIVO ANUAL</b>                  AVENA                  TRIGO</p> <p><b>BOSQUES</b>                  BOSQUE NATIVO                  BOSQUE NATIVO - EXOTICAS ASILVESTRADAS                  BOSQUE NATIVO - PLANTACION ABIERTO                  BOSQUE NATIVO ADULTO - RENOVAL PERENNE                  BOSQUE NATIVO ADULTO ABIERTO                  BOSQUE NATIVO ADULTO MUY ABIERTO                  BOSQUE NATIVO ADULTO PERENNE                  BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL ABIERTO                  BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL DENSO                  BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL MUY                  ABIERTO                  BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL PERENNE                  BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL                  SEMIDENSO                  BOSQUE NATIVO CON EXOTICAS                  ASILVESTRADAS MUY ABIERTO                  BOSQUE NATIVO CON EXOTICAS                  ASILVESTRADAS SEMIDENSO                  BOSQUE NATIVO RENOVAL ABIERTO                  BOSQUE NATIVO RENOVAL                  DENSO                  BOSQUE NATIVO RENOVAL MUY ABIERTO                  BOSQUE NATIVO RENOVAL PERENNE                  BOSQUE NATIVO RENOVAL SEMIDENSO</p> <p><b>HUMEDALES</b>                  OTROS TERRENOS HUMEDOS                  VEGAS</p> <p><b>AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION</b>                  CAJAS DE RIOS                  AFLORAMIENTOS ROCOSOS                  INCENDIO                  OTROS TERRENOS SIN VEGETACION                  PLAYAS Y DUNAS</p> <p><b>CUERPOS DE AGUA</b>                  EMBALSES-TRANQUES-CANALES                  LAGO-LAGUNA                  RIOS</p> <p><b>AREAS URBANAS</b>                  CIUDADES Y PUEBLOS                  INDUSTRIAS                  LOCALIDADES RURALES</p>
---	--

En la Tabla 5, se presentan en orden decreciente, en cuanto a su superficie y porcentaje que representan del total en el área de estudio, las distintas clases temáticas de uso del suelo obtenidas.

**Tabla 5.** Superficie por uso actual y porcentaje.

<b>CATEGORÍA USO ACTUAL/ COMUNAS</b>	<b>TOTAL (HA)</b>	<b>% DEL TOTAL</b>
PRADERAS Y MATORRALES	<b>161.465,80</b>	<b>34,03</b>
PLANTACIONES FORESTALES	<b>151.343,74</b>	<b>31,90</b>
TERRENOS AGRICOLAS	<b>103.425,26</b>	<b>21,80</b>
BOSQUES	<b>45.841,75</b>	<b>9,66</b>
AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION	<b>4.974,45</b>	<b>1,05</b>
CUERPOS DE AGUA	<b>3.965,46</b>	<b>0,84</b>
AREAS URBANAS	<b>1.733,96</b>	<b>0,37</b>
HUMEDALES	<b>1.420,55</b>	<b>0,30</b>
CULTIVO ANUAL	<b>314,11</b>	<b>0,07</b>
<b>TOTAL</b>	<b>474.485,08</b>	<b>100,00</b>

De acuerdo a la Tablas 5, la clase “Praderas y Matorrales” es la que ocupa la mayor superficie en el área de estudio del secano, con un 34 % de la superficie total. El segundo uso de importancia, casi en el mismo porcentaje que el anterior, corresponde a las plantaciones forestales (31.9 %) y en tercer lugar, lo ocupan los terrenos agrícolas (21,8%), las que en su conjunto representan el 87,7% del total en el área de estudio. El cuarto lugar lo ocupa la clase Bosques, con el 9,7 % de la superficie. El 2,6% restante se distribuye en las 5 clases de usos presentes.

En las Tablas 6 y 7 se presenta la distribución de la superficie, por clase temática y comuna y su distribución porcentual al interior de la comuna. Se observa que las comunas de Paredones y Pichilemu son las que concentran la superficie de plantaciones forestales; las comunas de Marchigue, Pumanque y Lolol concentran la superficie agrícola; el uso praderas y matorrales se reparte en partes similares en todas las comunas, con excepción de la comuna de Pichilemu que presenta menor superficie de esta clase y; los bosques se concentran en la comuna de Chépica (lo correspondiente al área de estudio).

La distribución de la superficie de uso actual desglosada en cada categoría y comunas se presenta en la Tabla 8.

**Tabla 6.** Superficie por uso actual y Comunas del área de estudio.

CATEGORÍA USO ACTUAL/ COMUNAS	SUPERFICIE (ha)											TOTAL
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA	TOTAL	
PRADERAS Y MATORRALES	15.732,86	9.338,64	16.343,05	25.686,45	16.597,17	21.802,48	21.910,54	11.228,03	10.238,12	12.588,45	<b>161.465,80</b>	
PLANTACIONES FORESTALES	33.764,01	46.932,80	9.791,61	10.631,30	17.454,52	17.978,74	3.165,00	7.083,01	1.634,53	2.908,22	<b>151.343,74</b>	
TERRENOS AGRICOLAS	4.734,55	6.320,46	14.653,78	15.790,45	25.588,53	10.910,45	14.285,08	5.325,82	4.606,68	1.209,47	<b>103.425,26</b>	
BOSQUES	1.170,41	6.759,15	2.561,50	6.092,07	4.023,28	9.771,73	2.013,76	5.587,72	2.622,16	5.239,97	<b>45.841,75</b>	
CUERPOS DE AGUA	78,87	621,40	218,79	230,79	670,46	388,14	1.520,58	201,13	26,30	9,00	<b>3.965,46</b>	
AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION	1.011,31	522,57	265,34	1.136,18	1.140,01	302,18	13,37	471,02	64,07	48,39	<b>4.974,45</b>	
AREAS URBANAS	110,48	464,51	72,09	101,04	100,60	120,40	574,41	176,33	14,10	0,00	<b>1.733,96</b>	
HUMEDALES	783,94	598,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,96	0,00	0,00	<b>1.420,55</b>	
CULTIVO ANUAL	0,00	0,00	128,64	125,26	28,65	0,00	31,56	0,00	0,00	0,00	<b>314,11</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>57.386,44</b>	<b>71.558,18</b>	<b>44.034,81</b>	<b>59.793,52</b>	<b>65.603,22</b>	<b>61.274,12</b>	<b>43.514,31</b>	<b>30.111,03</b>	<b>19.205,97</b>	<b>22.003,50</b>	<b>474.485,08</b>	

Tabla 7. Superficie por uso actual y Comunas en términos porcentuales.

CATEGORÍA USO ACTUAL/ COMUNAS	SUPERFICIE (ha)										
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA	
PRADERAS Y MATORRALES	27,42	13,05	37,11	42,96	25,30	35,58	50,35	37,29	53,31	57,21	
PLANTACIONES FORESTALES	58,84	65,59	22,24	17,78	26,61	29,34	7,27	23,52	8,51	13,22	
TERRENOS AGRICOLAS	8,25	8,83	33,28	26,41	39,00	17,81	32,83	17,69	23,99	5,50	
BOSQUES	2,04	9,45	5,82	10,19	6,13	15,95	4,63	18,56	13,65	23,81	
CUERPOS DE AGUA	0,14	0,87	0,50	0,39	1,02	0,63	3,49	0,67	0,14	0,04	
AREAS DESPROVISTAS DE VEGETACION	1,76	0,73	0,60	1,90	1,74	0,49	0,03	1,56	0,33	0,22	
AREAS URBANAS	0,19	0,65	0,16	0,17	0,15	0,20	1,32	0,59	0,07	0,00	
HUMEDALES	1,37	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	
CULTIVO ANUAL	0,00	0,00	0,29	0,21	0,04	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	
TOTAL	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

**Tabla 8.** Distribución de la superficie de uso actual por categoría y Comunas.

CATEGORÍA USO ACTUAL	SUPERFICIE (ha) COMUNAS											TOTALES
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA		
PLANTACIONES FORESTALES	33.764,01	46.932,80	9.791,61	10.631,30	17.454,52	17.978,74	3.165,00	7.083,01	1.634,53	2.908,22		151.343,74
EUCALIPTOS	3.677,55	5.339,94	1.839,06	2.435,55	2.611,96	3.077,15	1.218,46	1.430,64	38,27	40,15		21.708,72
PINO	22.113,18	29.854,69	6.103,98	5.997,04	8.270,92	5.626,17	468,23	1.292,16	1.371,79	2.278,89		83.377,03
PLANTACION EXOTICAS ASILVESTRADAS	148,64	4,83	0,00	0,00	0,00	17,11	2,22	0,00	0,00	0,00		172,79
PLANTACION FORESTAL	0,00	4.652,38	0,00	0,00	1.893,71	6.267,03	585,98	3.111,76	0,00	0,00		16.510,86
PLANTACION JOVEN O RECEN COSECHADA	7.824,65	7.080,97	1.848,57	2.198,70	4.677,94	2.991,28	890,11	1.248,46	224,47	589,18		29.574,34
PRADERAS Y MATORALES	15.732,86	9.338,64	16.343,05	25.686,45	16.597,17	21.802,48	21.910,54	11.228,03	10.238,12	12.588,45		161.465,80
ESPINAL	599,08	175,71	3.115,14	2.579,06	1.252,73	865,20	498,75	868,41	1.681,09	3.341,90		14.977,06
MATORRAL ABIERTO	3.338,66	844,41	3.493,38	4.714,20	1.284,96	1.279,57	1.318,85	278,58	1.724,14	1.536,61		19.813,35
MATORRAL ARBORESCENTE	20,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		20,11
MATORRAL ARBORESCENTE ABIERTO	25,68	917,77	1.039,69	1.797,61	1.818,37	3.933,84	1.607,95	659,07	531,12	2.107,84		14.438,95
MATORRAL ARBORESCENTE DENSO	812,48	372,82	235,99	1.111,62	13,48	43,71	41,66	22,73	972,85	653,42		4.280,77

CATEGORÍA USO ACTUAL	SUPERFICIE (ha) COMUNAS											TOTALES
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA		
MATORRAL ARBORESCENTE MUY ABIERTO	46,46	66,13	0,00	102,51	3.706,37	1.562,86	951,35	257,43	83,48	58,76		6.835,34
MATORRAL ARBORESCENTE SEMIDENSO	688,44	224,62	1.715,67	6.697,83	209,33	996,92	701,69	272,47	2.330,79	2.752,12		16.589,88
MATORRAL DENSO	583,96	301,71	228,14	207,88	0,00	147,75	13,25	0,00	279,46	45,64		1.807,80
MATORRAL ESCLEROFILO	685,02	1.701,78	956,88	614,11	1.633,10	5.277,20	3.674,74	3.170,07	238,99	221,59		18.173,46
MATORRAL MUY ABIERTO	4.073,27	2.036,41	2.231,79	1.684,08	2.594,30	2.946,79	4.775,03	1.685,19	933,92	0,00		22.960,79
MATORRAL PRADERA ABIERTO	0,00	0,00	0,00	507,76	86,38	158,76	34,78	1.336,83	53,12	13,56		2.191,19
MATORRAL PRADERA MUY ABIERTO	0,00	2,67	0,00	0,00	26,67	93,42	116,65	81,52	0,00	11,78		332,70
MATORRAL SEMIDENSO	134,54	54,16	2.054,74	1.575,77	509,30	472,27	2.417,54	36,94	1.373,40	1.733,02		10.361,67
MATORRAL SUCULENTAS MUY ABIERTO	0,00	5,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		5,85
PRADERA MANEJADA O ARTIFICIAL	3.601,07	1.277,09	941,06	3.319,13	2.666,24	1.185,75	1.527,37	843,04	35,76	112,22		15.508,74
PRADERA NATURAL	1.124,08	1.283,86	330,59	774,88	699,09	922,69	1.147,69	1.611,85	0,00	0,00		7.894,73
PRADERAS ANUALES	0,00	62,23	0,00		96,85	1.841,19	3.061,48	94,94	0,00	0,00		5.156,69
PRADERAS PERENNES	0,00	11,42	0,00		0,00	74,57	21,78	8,96	0,00	0,00		116,73

CATEGORÍA USO ACTUAL	SUPERFICIE (ha) COMUNAS												TOTALES
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA			
TERRENOS AGRICOLAS	4.734,55	6.320,46	14.653,78	15.790,45	25.588,53	10.910,45	14.285,08	5.325,82	4.606,68	1.209,47			103.425,26
ALMENDRO	0,00	0,00	15,18	98,05	43,41	0,00	0,00	56,75	0,00	0,00			213,39
ARANDANO AMERICANO	16,27	0,00	28,15	5,98	27,01	0,00	17,10	10,36	40,54	0,00			145,41
CEREAL	0,00	0,00	0,00	0,00	211,01	0,00	0,00	3,47	0,00	0,00			214,48
CEREZO	0,00	0,00	29,41	18,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			48,26
CHACRAS Y HORTALIZAS	0,00	0,00	147,29	331,36	84,92	1,08	0,00	0,00	215,69	0,00			780,35
CIRUELO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	232,85	0,00	0,00	0,00			232,85
CIRUELO EUROPEO	0,00	0,00	75,29	1.140,48	451,86	0,00	37,09	4,70	62,38	0,00			1.771,81
CULTIVO ANUAL	504,54	398,70	2.437,22	6.701,77	5.630,44	2.683,01	1.219,76	899,47	2.453,24	682,60			23.610,75
DURAZNERO CONSUMO FRESCO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,41			3,41
DURAZNERO TIPO CONSERVERO	0,00	0,00	18,99	0,00	3,21	0,00	0,00	0,00	27,72	1,32			51,25
FRAMBUESA	0,00	29,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			29,65
FRUTAL	0,00	0,00	22,89	53,04	249,57	41,84	156,70	0,00	46,91	13,21			584,16
FRUTILLAS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,32	0,00	0,00			1,32
HIGUERA	0,00	0,00	0,00	21,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			21,44
KIWI	0,00	0,00	10,70	33,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			44,29
LIMONERO	0,00	31,64	0,00	5,80	0,00	0,00	0,00	6,10	0,00	0,00			43,54
MANDARINO	0,00	0,00	0,00	3,97	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00			4,12

CATEGORÍA USO ACTUAL	SUPERFICIE (ha) COMUNAS											TOTALES
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA		
MEMBRILLO	0,00	0,00	0,00	1,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,92
MORAS CULTIVADAS E HIBRIDOS	0,00	0,00	0,58	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60
NARANJO	0,00	1,36	20,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	7,99		31,39
NECTARINO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,05		3,05
NOGAL	1,00	0,00	13,08	2,88	0,00	0,00	0,00	2,58	0,00	0,00		19,54
OLIVOS	13,57	0,00	412,85	1.510,68	366,46	0,00	1.559,00	0,09	0,00	8,79		3.871,43
PALITO	0,00	0,00	0,00	6,74	0,00	0,00	0,00	24,69	1,51	0,00		32,93
PISTACHO	0,00	0,00	7,83	0,00	4,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		12,06
RASTROJO	0,00	0,00	170,04	319,96	3.666,02	351,23	346,88	12,19	251,51	0,00		5.117,83
ROTACION CULTIVO PRADERA	3.962,25	5.641,91	9.943,10	2.568,65	9.600,93	7.734,32	10.212,79	4.151,36	1.061,13	178,71		55.055,14
TERRENOS EN BARBECHO	236,92	217,20	385,38	735,69	699,52	95,78	162,89	151,95	114,38	241,97		3.041,68
TUNA	0,00	0,00	3,05	0,00	24,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		27,35
VID DE MESA	0,00	0,00	127,35	88,62	9,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		225,55
VIÑAS Y PARRONALES	0,00	0,00	784,53	2.139,95	4.516,04	3,19	340,03	0,64	330,48	68,42		8.183,28

CATEGORÍA USO ACTUAL	SUPERFICIE (ha) COMUNAS											TOTALES
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA		
<b>BOSQUES</b>	<b>1.170,41</b>	<b>6.759,15</b>	<b>2.561,50</b>	<b>6.092,07</b>	<b>4.023,28</b>	<b>9.771,73</b>	<b>2.013,76</b>	<b>5.587,72</b>	<b>2.622,16</b>	<b>5.239,97</b>	<b>45.841,75</b>	
BOSQUE NATIVO	338,17	2.037,59	130,33	199,88	879,04	1.279,40	198,47	1.391,73	281,83	355,34	<b>7.091,79</b>	
BOSQUE NATIVO - EXOTICAS ASILVESTRADAS	0,00	30,41	0,00	0,00	130,99	245,03	168,66	37,89	0,00	0,00	<b>613,00</b>	
BOSQUE NATIVO - PLANTACION ABIERTO	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	6,03	0,00	56,41	<b>62,69</b>	
BOSQUE NATIVO ADULTO - RENOVAL PERENNE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.087,64	80,12	112,63	0,00	0,00	<b>1.280,39</b>	
BOSQUE NATIVO ADULTO ABIERTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,97	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>29,97</b>	
BOSQUE NATIVO ADULTO MUY ABIERTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	40,82	0,02	0,00	0,00	0,00	<b>40,84</b>	
BOSQUE NATIVO ADULTO PERENNE	0,00	0,00	88,94	0,00	0,00	797,77	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>886,71</b>	
BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL ABIERTO	0,00	0,00	0,00	18,14	28,70	74,09	18,91	0,00	2,42	0,00	<b>142,25</b>	
BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL DENSO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,13	0,00	0,00	<b>3,13</b>	
BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL MUY ABIERTO	0,00	0,00	0,00	1,84	69,25	32,69	0,00	9,29	0,00	0,00	<b>113,07</b>	

CATEGORÍA USO ACTUAL	SUPERFICIE (ha) COMUNAS											TOTALES			
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA					
BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL PERENNE	0,00	0,00	0,00	77,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,42
BOSQUE NATIVO ADULTO RENOVAL SEMIDENSO	0,00	0,00	10,01	14,88	3,30	12,39	0,00	0,00	3,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,41
BOSQUE NATIVO CON EXOTICAS ASILVESTRADAS MUY ABIERTO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,95
BOSQUE NATIVO CON EXOTICAS ASILVESTRADAS SEMIDENSO	0,00	0,00	0,00	0,00	2,91	0,00	4,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,81
BOSQUE NATIVO RENOVAL ABIERTO	6,85	779,53	84,03	704,06	930,54	477,19	365,81	567,17	611,97	468,30					4.995,44
BOSQUE NATIVO RENOVAL DENSO	0,00	19,90	0,00	437,54	0,00	104,36	0,00	2,20	10,91	2.224,79					2.799,69
BOSQUE NATIVO RENOVAL MUY ABIERTO	0,00	11,11	35,44	468,44	49,47	690,03	352,33	113,91	215,94	301,37					2.238,05
BOSQUE NATIVO RENOVAL PERENNE	802,71	3.791,22	2.079,53	3.831,08	1.355,09	4.436,22	702,19	2.947,30	1.264,21	1.824,72					23.034,27
BOSQUE NATIVO RENOVAL SEMIDENSO	22,68	89,40	133,21	338,55	573,97	464,12	117,41	392,62	234,89	9,04					2.375,88

CATEGORÍA USO ACTUAL	SUPERFICIE (ha) COMUNAS											TOTALES
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA		
CUERPOS DE AGUA	78,87	621,40	218,79	230,79	670,46	388,14	1.520,58	201,13	26,30	9,00		3.965,46
EMBALSES- TRANQUES- CANALES	0,00	8,77	36,50	114,93	520,01	274,71	1.486,91	13,85	15,27	0,00		2.470,95
LAGO-LAGUNA	56,98	205,58	25,08	115,86	150,45	80,73	33,67	2,20	11,04	9,00		690,58
RIOS	21,89	407,04	157,21	0,00	0,00	32,70	0,00	185,09	0,00	0,00		803,93
<b>AREAS DEPROVISTAS DE VEGETACION</b>	<b>1.011,31</b>	<b>522,57</b>	<b>265,34</b>	<b>1.136,18</b>	<b>1.140,01</b>	<b>302,18</b>	<b>13,37</b>	<b>471,02</b>	<b>64,07</b>	<b>48,39</b>		<b>4.974,45</b>
CAJAS DE RIOS	0,00	0,00	0,00	0,00	7,14	9,12	13,37	0,00	0,00	0,00		29,62
AFLORAMIENTOS ROCOSOS	51,69	0,00	0,00	0,00	0,00	7,71	0,00	0,00	0,00	0,00		59,40
INCENDIO	739,16	142,95	265,34	1.132,65	1.132,88	0,00	0,00	0,00	64,07	48,39		3.525,45
OTROS TERRENOS SIN VEGETACION	0,00	0,00	0,00	3,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		3,53
PLAYAS Y DUNAS	220,47	379,62	0,00	0,00	0,00	285,35	0,00	471,02	0,00	0,00		1.356,46

CATEGORÍA USO ACTUAL	SUPERFICIE (ha) COMUNAS											TOTALES
	PAREDONES	PICHILEMU	PUMANQUE	LOLOL	MARCHIHUE	LITUECHE	LA ESTRELLA	NAVIDAD	SANTA CRUZ	CHEPICA	TOTALES	
AREAS URBANAS	110,48	464,51	72,09	101,04	100,60	120,40	574,41	176,33	14,10	0,00	1.733,96	
CIUDADES Y PUEBLOS	110,48	456,92	72,09	101,04	88,63	116,32	355,09	146,88	14,10	0,00	1.461,55	
INDUSTRIAS	0,00	0,00	0,00	0,00	11,97	4,08	219,32	0,00	0,00	0,00	235,38	
LOCALIDADES RURALES	0,00	7,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,45	0,00	0,00	37,03	
HUMEDALES	783,94	598,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,96	0,00	0,00	1.420,55	
OTROS TERRENOS HUMEDOS	35,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,08	
VEGAS	748,86	598,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,96	0,00	0,00	1.385,47	
<b>CULTIVO ANUAL</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>128,64</b>	<b>125,26</b>	<b>28,65</b>	<b>0,00</b>	<b>31,56</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>314,11</b>	
AVENA	0,00	0,00	83,05	35,79	4,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	122,92	
TRIGO	0,00	0,00	45,59	89,46	24,58	0,00	31,56	0,00	0,00	0,00	191,19	
<b>TOTALES</b>	<b>57.386,44</b>	<b>71.558,18</b>	<b>44.034,81</b>	<b>59.793,52</b>	<b>65.603,22</b>	<b>61.274,12</b>	<b>43.514,31</b>	<b>30.111,03</b>	<b>19.205,97</b>	<b>22.003,50</b>	<b>474.485,08</b>	



# Capítulo 4

## HIDROLOGÍA DEL SECANO DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS

### **Autor:**

Hamil Uribe C.  
Ing. Ingeniero Civil Agrícola, Dr.  
Instituto de Invetigaciones Agropecuarias  
INIA



## **4.1 INTRODUCCIÓN**

El Secano de la Región de O'Higgins se caracteriza por la escasez de agua durante los meses de verano, dificultando el desarrollo de los rubros agrícola, industrial y otras actividades.

Existe la posibilidad de aumentar la disponibilidad de los recursos hídricos, por lo cual en el marco del "Programa de desarrollo productivo para el secano de la Región de O'Higgins" se han realizado estudios con el objetivo de determinar cuánta es el agua disponible, cómo se podría extraer y qué lugares tienen mejores potencialidades.

Los estudios realizados indicaron que los recursos hídricos son principalmente de origen pluvial, ocurriendo esencialmente en forma de escorrentía superficial durante los meses lluviosos del invierno (mayo a octubre). La mayor parte de la escorrentía superficial corresponde a escorrentía directa (de la Lluvia) y muy poco a caudal base.

Una parte pequeña de los recursos permite la recarga de las aguas subterráneas, que abastece los pozos noria y otras fuentes de agua subterráneas. Aunque la disponibilidad de aguas superficiales es la de mayor proporción, no coincide temporalmente con las demandas de riego, de tal forma que casi no se utilizan con este fin. Por otra parte las escasas aguas subterráneas permiten el uso doméstico y el riego de pequeñas superficies durante el verano, gracias a la existencia de pozos noria, que constituyen la principal fuente de agua, ampliamente difundida en la zona. Existen algunos acuíferos de mayor importancia que abastecen el riego de agricultura a mayor escala, como viñas y frutales, todo con riego tecnificado a presión.

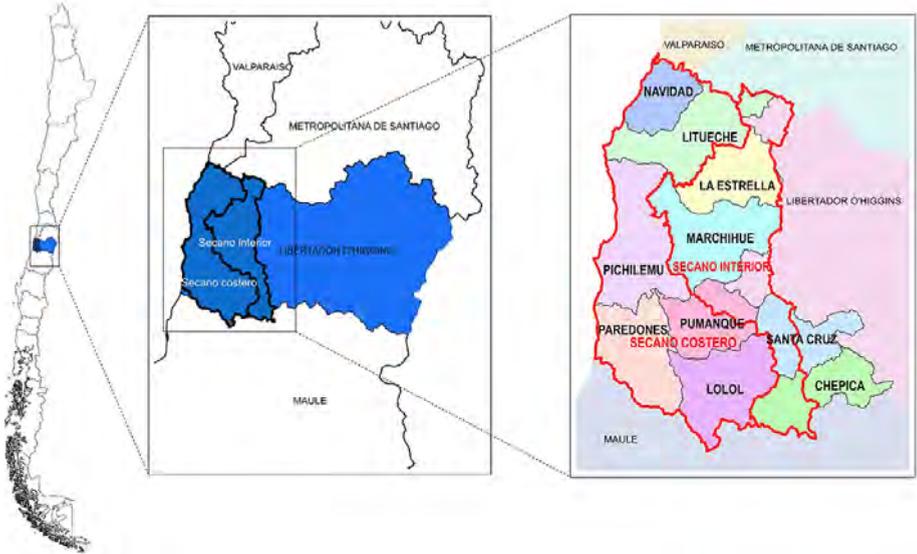
Dado que los recursos superficiales son abundantes durante el invierno, pero no durante la estación de mayor demanda, se localizaron lugares y se diseñaron pequeños embalses de temporada. Para ello resultó de gran importancia estudiar la hidrología de la zona bajo distintas condiciones de topografía y cobertura vegetal, puesto que se debe asegurar la disponibilidad de agua para llenar los embalses y por otra parte se deben diseñar los vertederos para evitar la destrucción de los muros por las fuertes crecidas que se pudieron registrar.

## **4.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA**

### ***4.2.1 Ubicación***

El secano de la Región de O'Higgins se ubica en la zona poniente de dicha región, entre las coordenadas 33°54'S y 34°56' S; y 71°23'W y 72°02'W y comprende las

comunas de Navidad, Litueche, La Estrella, Marchigüe, Paredones, Pichilemu, Pumanque, Lolol y la parte oeste de las comunas de Chépica y Santa Cruz (Figura 1). El secano de O'Higgins tiene un área aproximada de 4.995 km<sup>2</sup> y puede ser sub-dividido en Secano interior y Secano costero. La elevación varía entre 0 y 900 msnm.

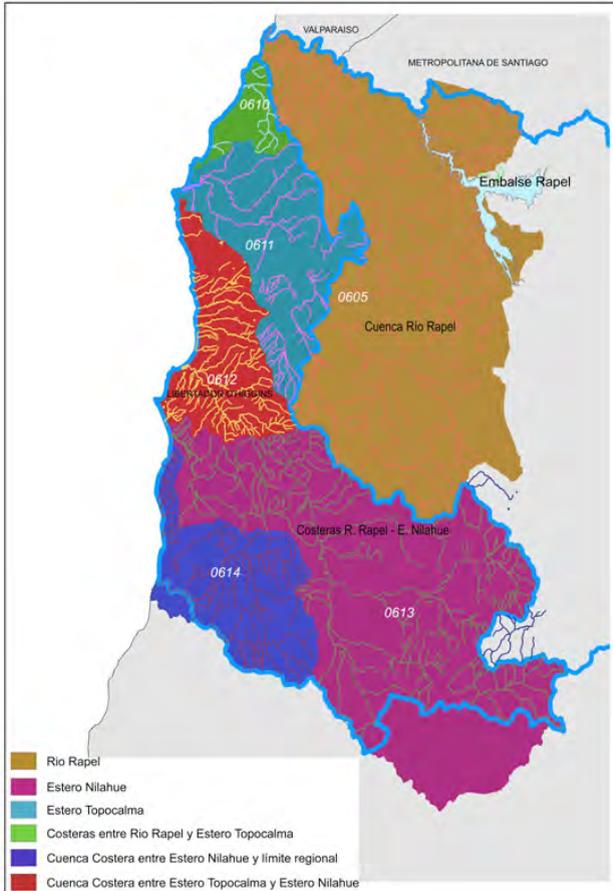


**Figura 1.** Ubicación general del secano. Muestra la región del Libertador Bernardo O'Higgins (azul), secano interior y costero (achurados) y comunas del secano.

#### 4.2.2 Hidrografía

El secano de la Región de O'Higgins está cubierto por dos cuencas principales, la del río Rapel, en la parte norte, y la del estero Nilahue en el sur. Esta última es incluida en las "cuencas Costeras Río Rapel - Estero Nilahue", junto a esteros menores localizados al sur de la cuenca del río Rapel y al norte de la del Nilahue, que llegan directamente al mar, como por ejemplo el estero Topocalma (Figura 2).

El secano costero drena principalmente hacia las cuencas Costeras Río Rapel - Estero Nilahue, por su parte el secano interior drena hacia la cuenca del río Rapel y sus afluentes.



**Figura 2.** Cuencas y sub-cuencas del secano de la Región de O'Higgins.

### Cuenca del río Rapel

El río Rapel se forma por la confluencia de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, en un punto inundado por el embalse Rapel. La porción poniente del embalse inunda el secano interior, hasta la central Rapel, luego el río cruza el secano costero hasta desembocar en el océano Pacífico, cerca del pueblo de Navidad. En el embalse, el río Rapel recibe como afluente al estero Alhue, que se constituye en el único aporte de cierta importancia. La cuenca completa del río Rapel drena una superficie de 13.695 km<sup>2</sup>, que permite mantener el embalse del mismo nombre, de 680 millones de m<sup>3</sup>, cuyos principales usos son la generación de hidroelectricidad y la recreación.

El río Rapel presenta un régimen pluvionival. Entre abril y septiembre hay un régimen pluvial con fuertes crecidas provocadas por lluvias en la precordillera y zona media de la cuenca, mientras entre octubre y marzo se observa un régimen nival con deshielos estacionales generados por el derretimiento del manto de nieve y aporte de los glaciares de la alta cordillera. El flujo de estos deshielos es captado parcialmente para riego a lo largo de los ríos antes de llegar al embalse Rapel.

### **Cuenca Costera Río Rapel - Estero Nilahue**

La cuenca Costera Río Rapel - Estero Nilahue (Código DGA 061) es de origen pluvial y se localiza entre la línea costera y el borde oriental de la Cordillera de la Costa (Figura 2). De acuerdo a la DGA, esta cuenca se divide en cinco sub-cuencas denominadas:

1. Cuenca Costera entre Río Rapel y Estero Topocalma (Código DGA: 610).
2. Cuenca Costera Estero Topocalma (Código DGA: 611).
3. Cuenca Costera entre Estero Topocalma y Estero Nilahue (Código DGA: 0612).
4. Cuenca Costera Estero Nilahue (Código DGA: 0613).
5. Cuenca Costera entre Estero Nilahue y límite regional (Código DGA: 0614).

La cuenca principal entre las cuencas costeras es la del estero Nilahue, seguida por la del estero Topocalma. El resto son pequeños esteros que van hacia el mar.

### **Subcuenca del estero Nilahue**

El estero Nilahue tiene una cuenca hidrográfica de 1.778 km<sup>2</sup> de orientación general noroeste. Nace como estero Los Coipos de la confluencia de los esteros Altos de Caune y El Parrón. Desde el este, recibe a los esteros Quiahue, Lolol y Pumanque, todos de longitud entre 20 y 25 km provenientes de la Cordillera de la Costa. El estero Nilahue desemboca en el extremo suroriental de la laguna de Cahuil, a través de la cual llega al océano Pacífico, unos 10 km al sur de Pichilemu. Sobre el estero Nilahue y sus afluentes principales existen dos embalses de cierta importancia, el embalse Lolol en la comuna del mismo nombre, con capacidad de 6,4 millones de m<sup>3</sup> y el embalse Nilahue sobre el estero de La Viña. Los recursos hídricos de la cuenca del estero Nilahue pueden ser complementados artificialmente por el embalse Convento Viejo ubicado en la cuenca del estero Chimbarongo.

### **Sub cuenca del estero Tocopalma**

La cuenca costera del estero Tocopalma limita al norte con la cuenca del río Rapel. El área de mayor interés de esta cuenca comprende entre el estero El Ganso por el sur y el estero Valle Hidango por el norte. El estero El Ganso es un tributario de la ribera

norte del estero Tocopalma, a unos 25 km aguas arriba de su desembocadura al mar. El estero Valle Hidango también es un tributario norte a unos pocos kilómetros de su desembocadura al mar. El régimen hidrológico es netamente pluvial.

#### **4.2.3 Clasificación hidrológica de suelos**

Sobre la base del potencial de escorrentía los suelos identificados en el área de estudio se clasificaron en grupos de hidrológicos. Los suelos se asignaron a uno de los cuatro grupos, de acuerdo al índice de infiltración del agua bajo las siguientes condiciones: a) el suelo no está protegido por vegetación, b) está completamente húmedo y c) recibe precipitaciones de tormentas de larga duración.

La metodología del USDA SCS considera cuatro grupos: A, B, C y D, definidos de la siguiente manera:

**Grupo A:** suelos que tienen un alto índice de infiltración (bajo potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Están formados principalmente por arenas profundas, bien drenadas o excesivamente drenadas, o arenas de textura gruesa. Estos suelos presentan una tasa elevada de transmisión de agua.

**Grupo B:** suelos que tienen un índice de infiltración moderado cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos moderadamente profundos o profundos, moderadamente bien drenados o bien drenados con una textura de moderadamente fina a moderadamente gruesa. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.

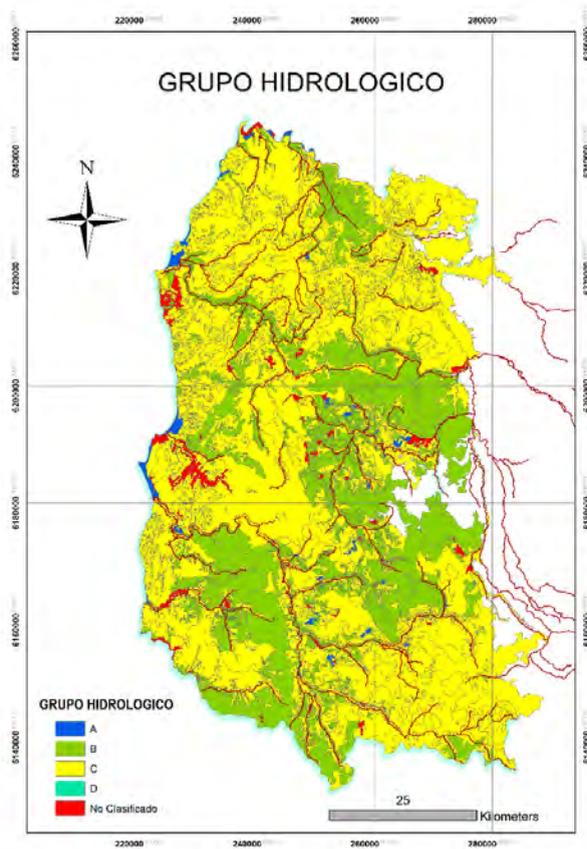
**Grupo C:** suelos que tienen un índice de infiltración lento cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos de textura moderadamente fina o fina. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua lenta.

**Grupo D:** suelos que tienen un índice de infiltración muy lento (alto potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Se trata fundamentalmente de arcillas con alta capacidad para expandirse y contraerse, suelos con un elevado nivel freático, suelos que presentan una capa de arcilla en la superficie o cerca de la superficie y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

La Figura 3 presenta la distribución de los grupos hidrológicos del secano de la Región de O'Higgins.

Se encontró que el suelo con mayor área le corresponde al suelo de Tipo C con el

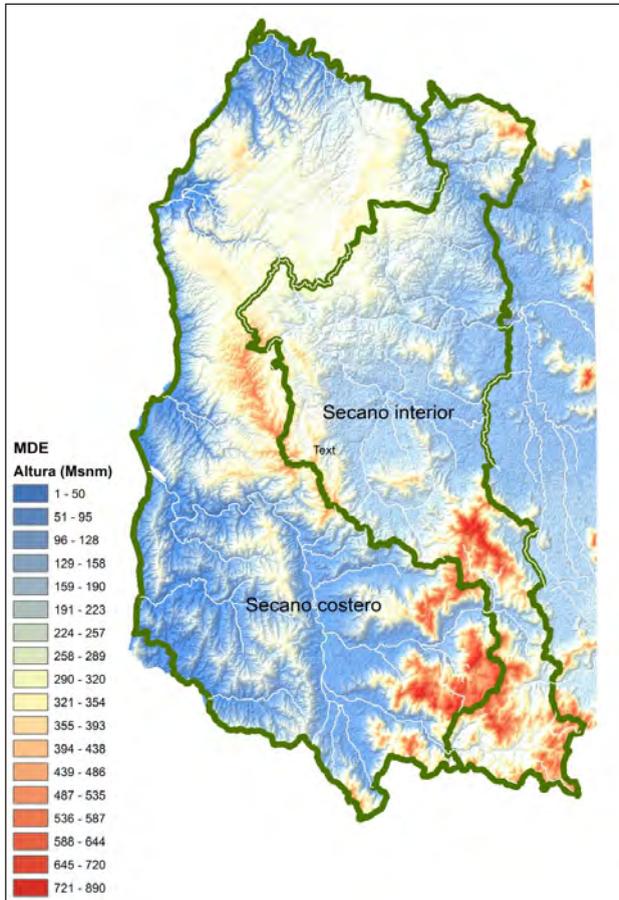
68% del área total de la cuenca, le sigue el suelo de Tipo B con el 30%, mientras el suelo de Tipo A y D en conjunto, alcanzan a menos de 1%.



**Figura 3.** Distribución de los grupos hidrológicos del secano de la región de O'Higgins.

#### 4.2.4 Relieve

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) corresponde a una representación digital de la altura del terreno en una región determinada. La Figura 4 muestra la imagen del MDE del secano de la Región de O'Higgins donde se aprecian las zonas de mayor y menor altitud y los cursos de agua. Esta fue obtenida del MDE ASTER (AdvancedSpaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), con una resolución espacial de 30x30 m.



**Figura 4.** Modelo Digital de Elevación (MDE) del secano de la Región de O'Higgins.

Otro subproducto del MDE que es de gran utilidad es el mapa de pendientes, que indica la inclinación del terreno, factor que tiene gran influencia sobre el comportamiento hidrológico de las cuencas, la susceptibilidad a erosión, etc.

La mayor parte del secano costero presenta altas pendientes, entre 6 y 30 grados, exceptuando los valles del estero Nilahue y otros, que son áreas más planas (Figura 5).

Por otra parte, el secano interior presenta una zona donde predominan las pendientes menores a 6% ubicada desde la comuna de Marchigüe hacia el norte, mientras hacia el sur prevalecen pendientes mayores al 15% (Figura 5).

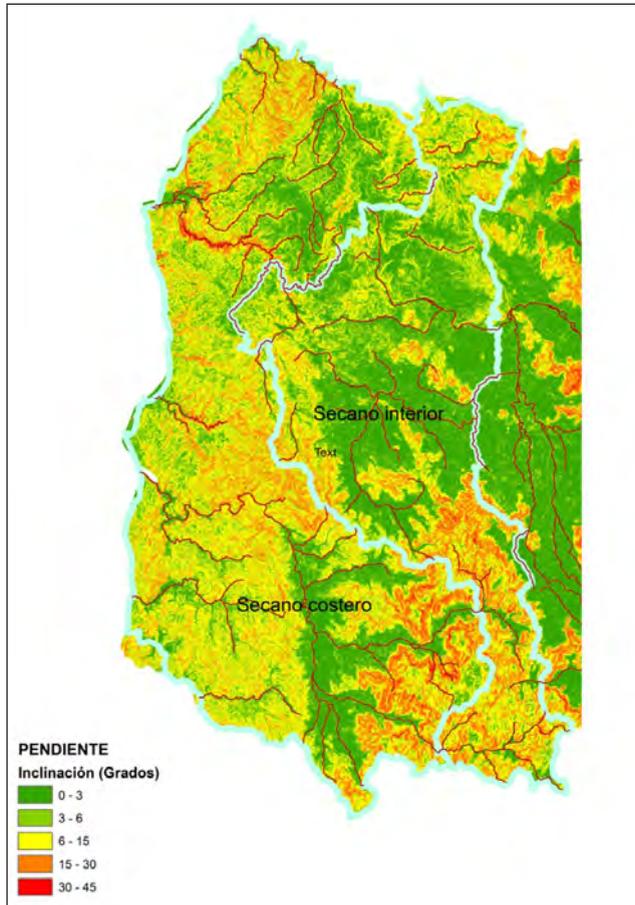


Figura 5. Mapa de pendientes (grados) del secano de la Región de O'Higgins.

### 4.3 AGUAS SUPERFICIALES

Las características topográficas, tipo de suelo, cobertura vegetal, distribución de las lluvias y otras, hacen del secano una zona muy particular. A pesar de una precipitación media anual de más de 600 mm, la escasez de agua es una constante durante los meses de verano, debido a la mala distribución de las lluvias, la limitada capacidad del suelo para retenerla, las fuertes pendientes y el manejo del suelo que favorecen la escorrentía superficial. De esta forma los flujos superficiales en las cuencas del secano son de tipo intermitente, ocurriendo con posterioridad a los eventos de precipitación y desapareciendo en unos días o semanas.

En el secano de la Región de O'Higgins sólo existe la estación fluviométrica del Estero Nilahue en Santa Teresa, perteneciente a la Dirección General de Aguas (DGA). La distribución promedio mensual de las precipitaciones y escorrentía superficial en el Estero Nilahue se muestra en la Figura 6 y la misma información en forma acumulada en la Figura 7.

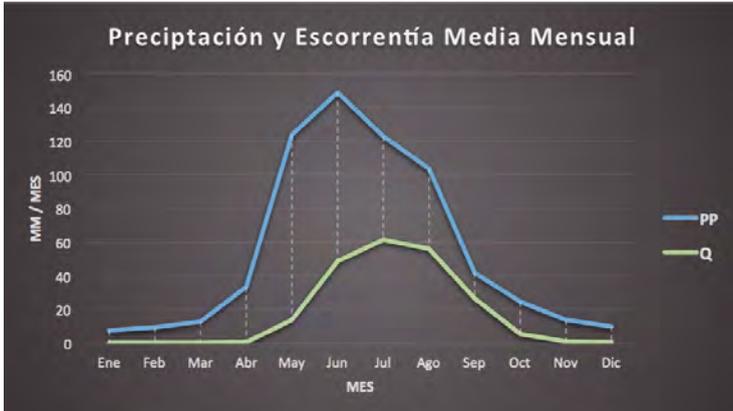


Figura 6. Distribución mensual de las precipitaciones y escorrentía superficial.

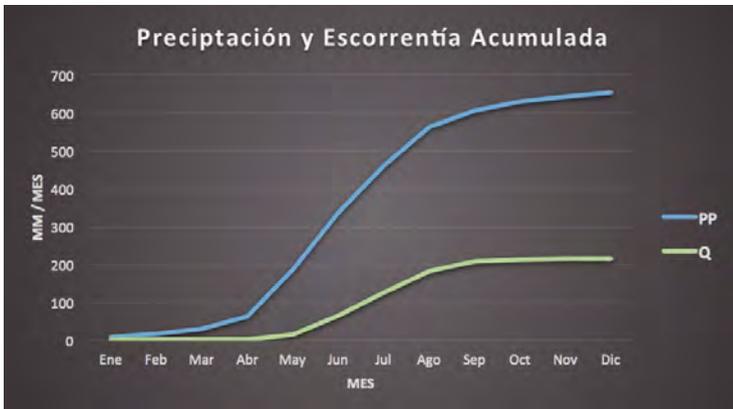


Figura 7. Precipitaciones y escorrentía superficial acumulada.

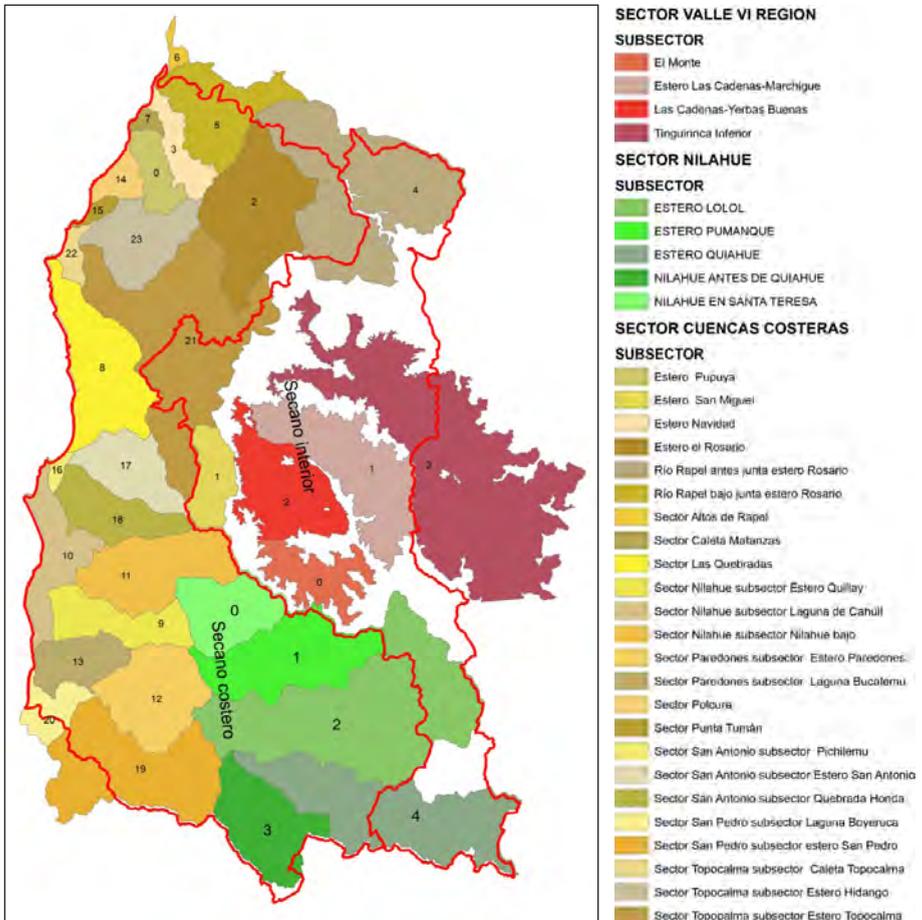
Este es un típico comportamiento hidrológico del secano, donde se aprecia la distribución del agua antes mencionada, en este caso para una cuenca de 177.000 ha.

También se puede notar que existe un periodo de retardo en el inicio del escurrimiento superficial, que comienza después de cierta cantidad de milímetros de lluvia caída, valores que van de 100 mm a 200 mm para esta condición. Otro aspecto interesante es que el 33% de las lluvias escurre en el estero Nilahue, esto significa en coeficiente de escorrentía de 33%.

#### **4.4 AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Con respecto a las aguas subterráneas se puede mencionar que la Dirección General de Aguas (DGA) ha definido sectores acuíferos en la Región de O'Higgins, de los cuales la gran mayoría se encuentran declarados como zona de restricción. La determinación de zona de restricción se realiza mediante una resolución de la Dirección General de Aguas. Según el artículo 65 del Código de Aguas, serán áreas de restricción aquellos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en los que exista el riesgo de grave disminución de un determinado acuífero, con el consiguiente perjuicio de terceros ya establecidos en él.

En el secano de la Región de O'Higgins se encuentran los sectores "Cuencas Costeras VI Región", Nilahue y parte del sector Valle VI Región, cada uno de los cuales se compone de subsectores. En la Figura 7 se presentan los sectores y subsectores correspondientes al secano interior y costero de la Región de O'Higgins.



**Figura 7.** Sectores y subsectores correspondientes al secano interior y costero de la región de O'Higgins.

#### 4.5 EMBALSES PEQUEÑOS

Los embalses pequeños, comúnmente llamados micro-embalses, son acumulaciones de agua artificiales gracias a la construcción de un muro, generalmente de tierra, menor a 5 m de altura y con menos de 50.000 m<sup>3</sup> de capacidad. Estas características los hacen quedar fuera de las obras regidas por el Artículo 294 del código de Aguas y por ende no requieren autorizaciones especiales de la Dirección General de Aguas.

La Figura 8 presenta el esquema de un embalse y su área asociada. La cantidad de agua máxima que podría ser embalsada dependerá del área de la cuenca aportante y de la lluvia, además de otros factores como el tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno, etc. Por supuesto en muchos casos el agua aportada por la cuenca excede la capacidad del embalse y continúa su curso por el estero en dirección aguas abajo. Para evacuar los excesos de agua es muy importante contar con un vertedero, cuya función es sacar el excedente de agua en periodos de crecida, de tal forma que no dañe el muro.

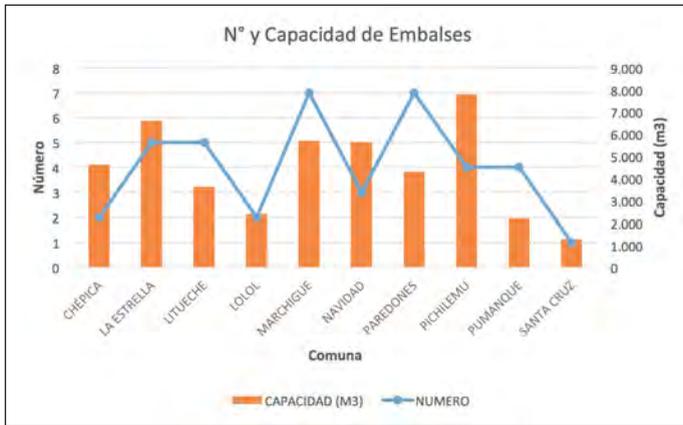


**Figura 8.** Embalses y sus componentes principales.

De lo anterior se deduce la importancia de la hidrología para este tipo de obras. Si se cuenta con información hidrológica, por un lado se puede estimar el volumen de agua que producirá la cuenca, lo que dependerá de sus tamaño, pendiente, cobertura vegetal, cantidad y distribución de la lluvia, tipo de suelo, entre otras. Por otra parte es posible dimensionar el vertedero de acuerdo a los caudales máximos estimados. Esto podría determinar grandes ahorros, ya sea en la construcción del vertedero o en reparaciones del muro cuando se haya dañado.

#### ***4.5.1 Datos cuantitativos en relación a pequeños embalses del secano de O'Higgins***

Durante el desarrollo del trabajo en el secano de la Región de O'Higgins se seleccionaron y diseñaron 40 tranques pequeños en diez comunas. Las Figuras 9 y 10 muestran resultados obtenidos que relacionan número de embalses, capacidad y costo.

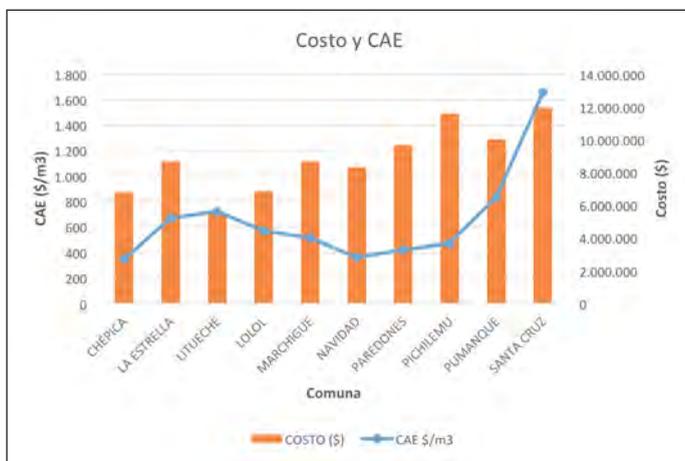


**Figura 9.** Numero de embalses y sus capacidades de almacenamiento, promedio por comuna.

En relación con la capacidad de almacenamiento se puede decir que hay algunas comunas que presentaron promedios más altos. Esto significa que, dadas las restricciones de altura del muro (<5m) y de costo impuestas para el diseño, en dichas comunas existen mejores condiciones topográficas para la construcción de embalses pequeños. Es así como las comunas de Pichilemu, La Estrella, Marchigüe y Navidad tuvieron en promedio más de 5.000 m<sup>3</sup> por embalse. Por otra parte en Lolol, Santa Cruz y Pumanque la acumulación promedio fue menor a 2.500 m<sup>3</sup>. El resto de las comunas, Chépica, Paredones y Litueche tuvieron un comportamiento intermedio, entre 2.500 y 5.000 m<sup>3</sup>.

El otro aspecto que fue posible analizar es costo por m<sup>3</sup> de agua acumulada. Este es un índice que relaciona la inversión y capacidad del embalse. La inversión corresponde principalmente al movimiento de tierra para la construcción del muro y el costo del vertedero. En ambos casos, los valores monetarios están relacionados a condiciones naturales del terreno. El movimiento de tierra tiene que ver con el tamaño del muro, que a su vez depende de que existan angosturas que permitan construir muros cortos. El costo del vertedero es dependiente de su capacidad para evacuar agua, y esta a su vez determinada por el tamaño de la cuenca aportante y sus características geomorfológicas, vegetacionales y por supuesto la distribución de las lluvias. El otro factor considerado es el volumen de acumulación, que depende de la topografía de la zona inundada principalmente.

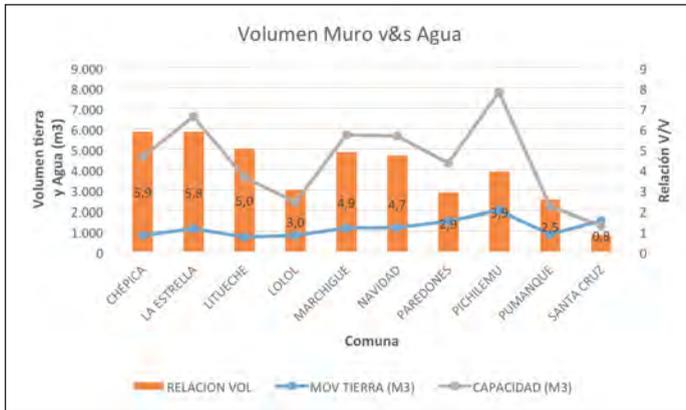
La Figura 10 muestra el costo promedio por comuna de los embalses y el Costo Anual Equivalente (CAE) por metro cubico de agua. El CAE fue calculado a 10 años plazo y con una tasa de interés del 12% anual. Los valores son en pesos chilenos a la fecha de junio de 2013.



**Figura 10.** Costo y CAE promedio de los embalses por Comuna.

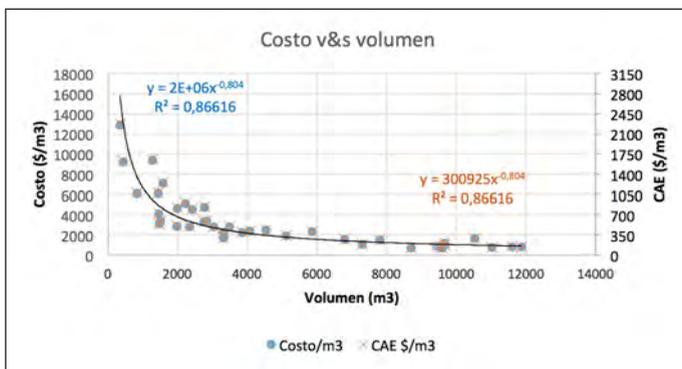
Se observa que el CAE va desde \$350 por m<sup>3</sup> hacia arriba, alcanzando promedios por comuna cercano a \$1.700 por m<sup>3</sup>.

Otro aspecto que se evalúa normalmente en los embalses es la relación del volumen embalsado versus el volumen del muro. Este es un indicador que relaciona los beneficios en agua contra los costos en movimiento de tierra. Para los embalses del secano de O'Higgins los valores obtenidos no fueron muy altos (Figura 11), siendo menores a 6, en promedio por comuna. Notar que el volumen promedio de los muros (movimiento de tierra) varía en baja proporción entre comunas, no así el volumen de agua embalsado que es altamente variable, alto en algunas comunas como La Estrella y Pichilemu, y bajo en Lolol, Pumanque y Santa Cruz.



**Figura 11.** Volumen embalsado y volumen de muro (eje izquierdo) y relación entre ellos (eje derecho).

A partir de los embalses diseñados se obtuvieron relaciones matemáticas de tipo potencial entre el volumen embalsado y el costo de la obra de acumulación, con buen nivel de correlación (Figura 12). Los embalses entre 2.000 y 4.000 m<sup>3</sup> presentaron un costo y un CAE intermedio. A partir de 4.000 m<sup>3</sup> el costo y CAE de los embalses por metro cubico de agua es más bajo y embalses de menos de 2.000 m<sup>3</sup> sobrepasan los \$4.000 por metro cubico, con un CAE mayor a \$730 por m<sup>3</sup>, siendo no recomendables desde un punto de vista económico.

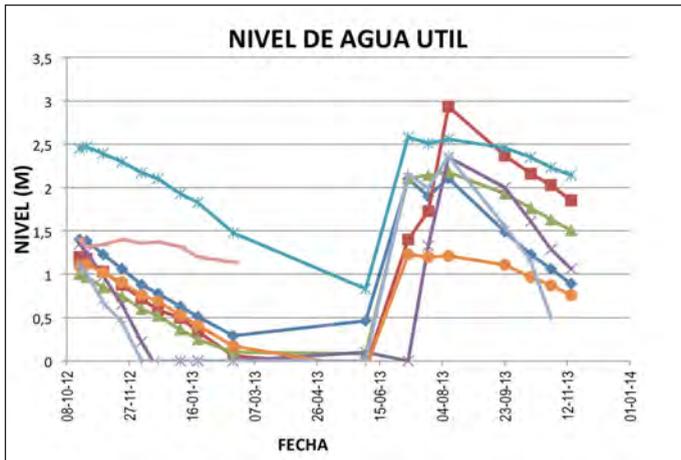


**Figura 12.** Costo y CAE en relación al volumen embalsado.

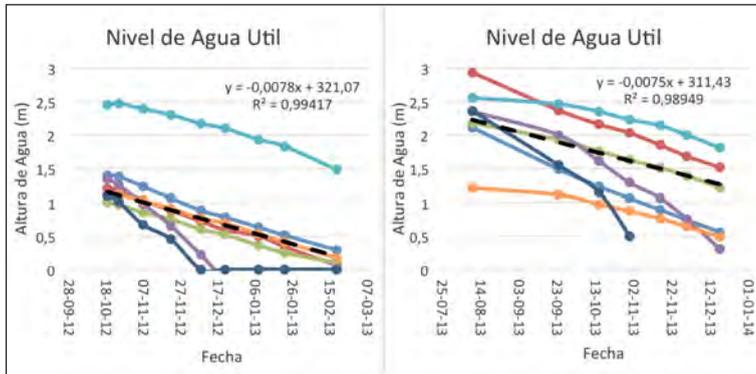
#### 4.5.2 Pérdidas de Agua en los pequeños embalses

Del total del agua acumulada, no toda queda disponible para su uso en riego u otro destino. Ello porque existen pérdidas relacionadas principalmente a dos fenómenos: las filtraciones y la evaporación. Se han realizado mediciones en pequeños acumuladores existentes para cuantificar las pérdidas (Figura 13). Se pudo apreciar el comportamiento temporal de varios embalses en las comunas de Navidad, Litueche, La Estrella y Marchigüe durante 13 meses. Se aprecia que hay un descenso del nivel de agua a partir de las últimas lluvias hasta el verano. Luego, con las lluvias el nivel sube nuevamente y se repite el ciclo. Se observa que en la mayoría de los embalses la pendiente de la reducción de nivel es similar y en algunos casos hay comportamientos irregulares.

La reducción de nivel obedece a los dos procesos antes mencionados, evaporación y filtración. Para analizar el descenso del agua se compararon los periodos de vaciamiento de los embalses en la temporada 2012-2013 y 2013 (Figura 14). La pendiente de descenso se ajusta muy bien a una línea recta ( $R^2=0.99$  y  $R^2=0.98$ ), cuya pendiente es de 0.0078 y 0.0075 m/día, para un caso representativo.

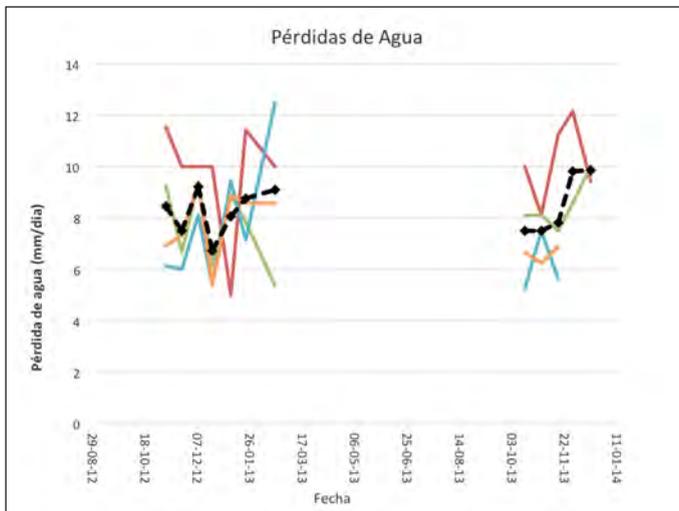


**Figura 13.** Variación temporal del nivel del agua en embalses pequeños.



**Figura 14.** Comparación del descenso del nivel de agua para dos periodos de 2012-2013. Línea segmentada corresponde a regresión representativa del cambio de nivel del agua.

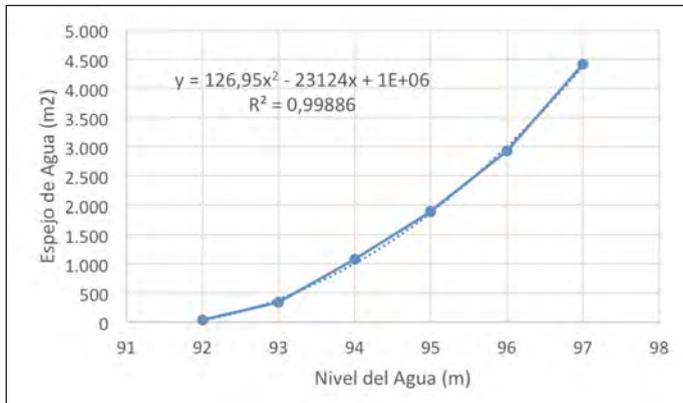
Para ver más claramente los valores se analizaron las variaciones diarias por periodo de medición y se obtuvo el gráfico de la Figura 15. Se aprecia que las reducciones de nivel de agua generalmente están entre 6 y 12 mm/día y en promedio (línea segmentada negra) entre 8 y 10 mm/día. Estos valores se mantienen a lo largo del tiempo y son bastante altos. Consideremos un espejo de agua de 2500 m<sup>2</sup> y 9 mm/día de reducción de nivel. Esto significa 22.5 m<sup>3</sup> diarios de agua perdida. En 10 días 225 m<sup>3</sup> y en un mes 675 m<sup>3</sup>.



**Figura 15.** Comparación de las tasas de pérdida de agua en varios embalses en dos periodos de medición. Línea segmentada negra corresponde al promedio.

Otro punto interesante es que la variación de nivel es la misma cuando el embalse está lleno y cuando tiene poca agua. Sin embargo las pérdidas por evaporación son relativamente bajas al inicio del vaciado de los embalses y aumentan a medida que se acerca el verano, lo que significa que las pérdidas por filtración deberían comportarse justo al revés. Esto parece bastante lógico puesto que a mayor carga hidráulica, mayor filtración si el embalse está lleno y viceversa. La suma del efecto de las filtraciones y evaporación es un valor constante, de 8 a 9 mm/día en gran proporción de los embalses evaluados. Esta misma tasa ha sido encontrada por el autor en mediciones de embalses del secano de la Región del Biobío.

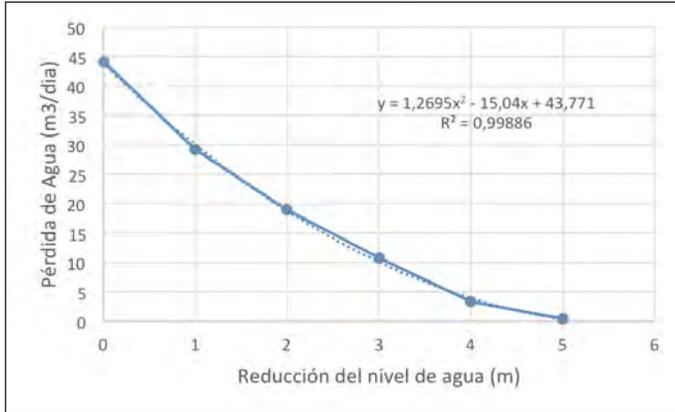
Si el análisis se realiza considerando las pérdidas de agua en volumen, se debe tener en cuenta que a mayor altura de agua, mayor volumen de pérdida por unidad de reducción del nivel. Por ejemplo, consideremos un embalse de 8500 m<sup>3</sup> de capacidad, con una altura de muro de 5 m, cuya relación de altura de agua versus área de espejo se muestra en la Figura 16. Se aprecia que a mayor cota o nivel del agua, mayor es el área de espejo. A cota 94 m de llenado el área es de 1000 m<sup>2</sup>, mientras a cota 97 m, el área es de 4500 m<sup>2</sup>.



**Figura 16.** Relación de Altura de Agua y Área de espejo para el embalse del ejemplo.

Dado que se han medido pérdidas reales del orden de 9 mm/día y estas son relativamente estables en distintos meses, si llevamos las pérdidas a volumen, observamos que ocurren en mayor cantidad si el embalse está más lleno y viceversa.

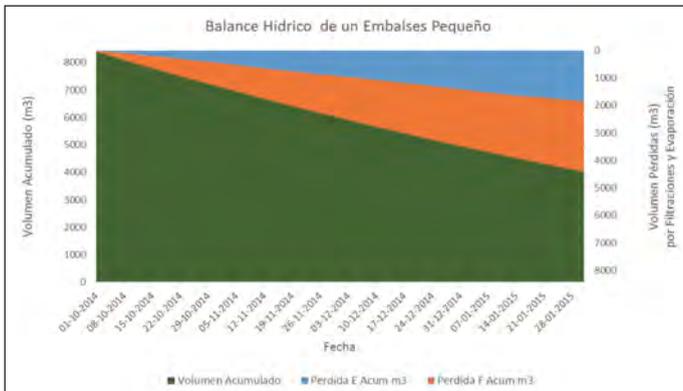
Bajo estas condiciones el embalse del ejemplo presenta pérdidas volumétricas diarias según la Figura 17. Si el nivel se ha reducido 1 m, desde el nivel máximo, las pérdidas son de 29 m<sup>3</sup> al día. Si el embalse ha bajado 3 m, las pérdidas son de 11 m<sup>3</sup> al día.



**Figura 17.** Relación de reducción de nivel de agua y volumen diario de pérdida de agua para el embalse del ejemplo.

A diferencia de las pérdidas en altura de agua, de 9 mm al día aproximadamente, que son estables, las pérdidas en volumen presentan variabilidad ya que dependen de la forma o topografía del área inundada y del tamaño de la misma.

Las pérdidas totales se distribuyen entre evaporación desde la superficie y filtraciones a través del fondo y muro de los embalses. Con el embalse del ejemplo y datos climáticos reales de evaporación y precipitaciones diarias se realizó un balance para determinar qué porcentaje de agua se pierde, cuándo y en qué forma. La Figura 18 muestra el resultado del balance en forma gráfica.



**Figura 18.** Balance hídrico de un embalse. Pérdidas por evaporación (E), por filtración (F) y volumen embalsado en el tiempo.

Los resultados obtenidos indicaron que del total del agua acumulada en el embalse al 1° de octubre de 2014, de 8434 m<sup>3</sup>, el 30% se perdió por filtraciones y el 22% por evaporación, dando un total de pérdidas de 52%, hasta el 31 de enero de 2015.

Notar que en el eje de la izquierda mide el volumen acumulado del embalse, el cual se va reduciendo en el tiempo. Por otra parte, el eje de la derecha, que es inverso, cuantifica las pérdidas por filtraciones y por evaporación desde la superficie del agua. Se aprecia que en los primeros meses las pérdidas por filtración son mayores en proporción, que las por evaporación.

De análisis se puede deducir que las pérdidas en los embalses pequeños son muy relevantes y deben ser consideradas en el cálculo de la superficie regable. En el ejemplo se pierde más de 50% del agua y la proporción podría ser incluso mayor en embalses de menor altura de agua.

Las pérdidas por filtraciones parecen ser más importantes que la evaporación, lo que significa que se deberían mejorar las técnicas constructivas o usar algún tipo de material que reduzca la conductividad hidráulica del fondo y paredes. El revestimiento de este tipo de embalses no es rentable debido al alto costo de los materiales requeridos en gran cantidad.

A pesar de los problemas descritos, los embalses siguen siendo una solución factible para el secano si se realizan los cálculos hidrológicos adecuados, debido a que existen lugares donde emplazarlos, existe el flujo necesario para llenarlos, el costo del agua es menor que en otras opciones de cosecha de agua y lo más importante, están los agricultores quienes necesitan el agua para progresar.



# Capítulo 5

## BALANCES HÍDRICOS EN CUENCAS PEQUEÑAS

### **Autor:**

Hamil Uribe C.  
Ing. Ingeniero Civil Agrícola, Dr.  
Instituto de Invetigaciones Agropecuarias  
INIA



## 5.1 INTRODUCCIÓN

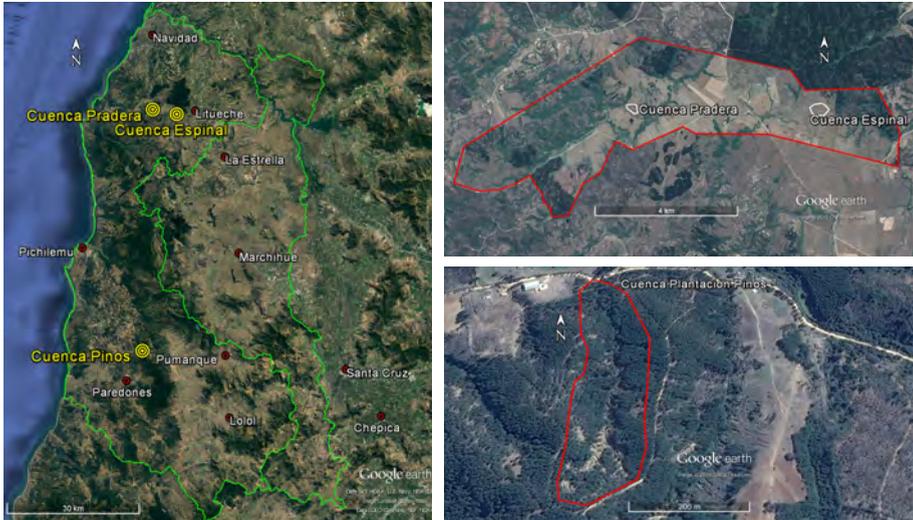
Dada las características del secano de la Región de O'Higgins y la escasa información hidrológica local existente, es muy importante estudiar la zona a nivel de microcuencas. Esto permite analizar en mejor forma la disponibilidad de agua superficial para la construcción de obras, como por ejemplo pequeños tranques, en beneficio de los pequeños productores agrícolas de la zona.

La disponibilidad de agua en las cuencas está asociada a diversos factores, tales como clima, topografía, tipo de suelo, cobertura vegetal, redes de drenaje, etc. La combinación de estos factores afecta el balance hídrico y permite que una cuenca cuente con más o menos agua, tenga crecidas grandes o pequeñas. Es decir, finalmente influye sobre la disponibilidad anual de agua para acumuladores y caudales extremos que deben ser evacuados por los vertederos de los embalses, evitando la destrucción del muro.

En este estudio se evaluaron tres cuencas pequeñas, durante tres años, con el fin de cuantificar los parámetros del balance hídrico bajo distintas condiciones de suelo, uso de suelo y topografía, representativas de la zona.

## 5.2 ÁREA DE ESTUDIO E INSTRUMENTACIÓN

En el área de estudio se seleccionaron tres microcuencas representativas, con superficies de 7; 8 y 13 ha, mostradas en la Figura 1 y caracterizadas en la Tabla 1. Cada microcuenca tuvo un uso de suelo representativo del secano. La microcuenca de 7 ha, localizada en el sector El Calvario, comuna de Paredones, presentó cobertura de plantación de pinos adultos. Las otras dos microcuencas se ubicaron en la comuna de Litueche, en el Centro Experimental Hidango, perteneciente al INIA y corresponden a 8 ha de pradera y 13 ha de espinal. La Figura 1 presenta la localización de las microcuencas en el secano de la Región de O'Higgins.



**Figura 1.** Ubicación de las tres cuencas seleccionadas para el estudio. A la izquierda un mapa de ubicación del secano de la Región de O'Higgins. A la derecha arriba, en rojo Centro Experimental Hidango y en blanco la microcuencas sobre pradera (izq.) y espinal (der.). A la derecha abajo, cuenca con plantación de pinos en Paredones.

Además de la cobertura vegetal, existen otras características importantes para el análisis hidrológico de las cuencas, que deben ser considerados al realizar el análisis del balance hídrico. La Tabla 1 muestra una caracterización de las tres microcuencas evaluadas.

**Tabla 1.** Caracterización de las microcuencas del secano de O'Higgins.

1. Característica	Unidad	Microcuenca N° 1	Microcuenca N° 2	Microcuenca N° 3
Cobertura Vegetal	-	Pinos	Espinal	Pradera
Área	ha	7	13	8
Perímetro	km	1,2	1,5	1,1
Elevación min.	m.	159	296	294
Elevación max.	m.	209	302	316
Longitud del cauce Principal	km	0,47	0,55	0,39
Pendiente del cauce Principal	M/m	0,09	0,01	0,056

La escorrentía de las cuencas es de origen pluvial con escasos o nulos aportes de aguas subterráneas. Los cauces de las microcuencas cubiertas con pradera y espinal, en el Centro Experimental Hidango pertenecen a la sub-cuenca del estero Topocalma, mientras la microcuenca con pinos es parte de la sub-cuenca del Estero Nilahue. Todas ellas pertenecientes a las cuencas Costeras Rio Rapel - Estero Nilahue.

A la salida de cada microcuenca se instalaron estructuras de aforo tipo canoa Santa Rita, con el objetivo de medir el flujo cada 5 minutos durante los tres años de estudio (Foto 1). Este tipo de estructura de aforo fue elegida debido a su capacidad de auto limpieza, factor fundamental en las condiciones del secano, donde los eventos de lluvia producen aumentos importantes del caudal, con gran arrastre de sedimentos. Otro tipo de aforadores, como por ejemplo los vertederos de pared delgada (triangulares, rectangulares o trapezoidales) quedarían completamente sedimentados durante un evento de lluvia, perdiendo su capacidad de medir el flujo. Otro aspecto esencial a considerar para medir la escorrentía en el secano es la alta variación en el rango del flujo a medir. Durante periodos de poca lluvia es posible encontrar caudales base mínimos en los esteros, de algunos litros por minuto por ejemplo. Sin embargo el valor del flujo fácilmente puede aumentar 100 o más veces durante un evento de precipitación intenso y la estructura de aforo debe tener la capacidad de medir con buena resolución y exactitud en ambas condiciones extremas.



**Foto 1.** Canoa Santa Rita en microcuenca con plantación de pinos.

En todas las microcuencas se utilizó el mismo tipo de estructura de aforo, equipadas con dos sensores de presión Hobo en cada caso (Foto 2). Un sensor de presión estuvo sumergido en el agua y el otro a presión atmosférica. Con ambas lecturas, mediante el software HOBOWare Pro, se obtuvo el nivel del agua en la canoa y a partir de este dato, el caudal que escurrió, gracias a una curva de descarga (Figura 2).



Foto 2. Sensor de presión Hobo U20.

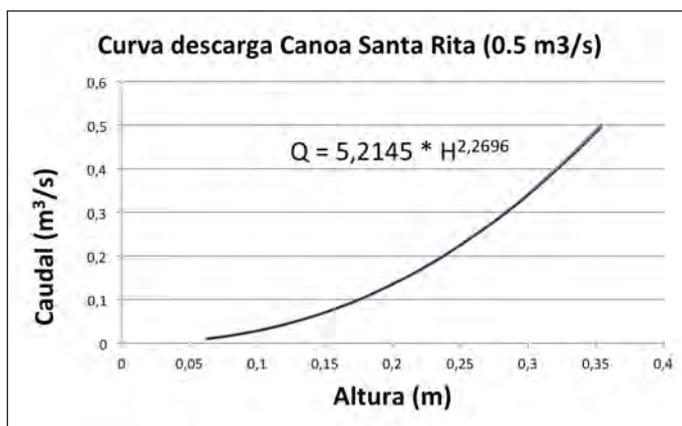
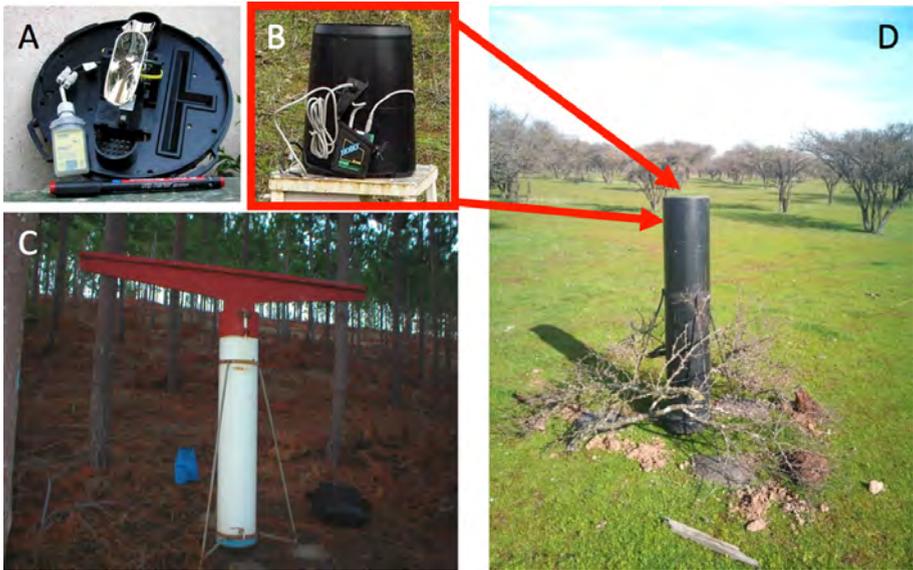


Figura 2. Curva de descarga de canoa Santa Rita con capacidad para 0,5 m³/s.

Para la medición de precipitación se utilizaron pluviómetros de balancín con registradores Hobo (Foto 3 A y B), que permitieron almacenar datos y extraerlos con la ayuda de un computador portátil. El equipo registró un pulso cada 0,2 mm de lluvia caída. En las microcuencas cubiertas con espino y pradera además existen estaciones meteorológicas automática y manual del Campo Experimental Hidango del INIA. En

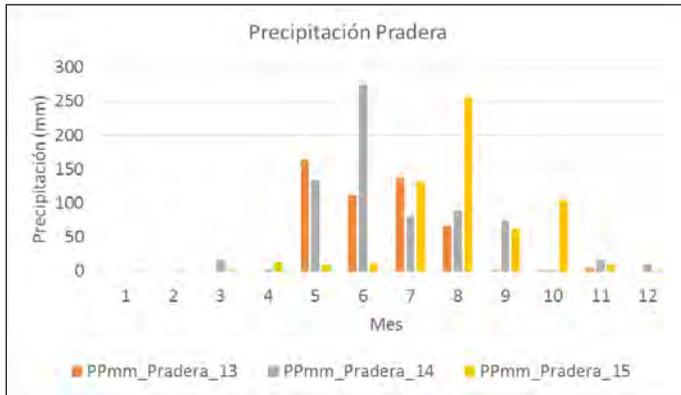
la cuenca con pinos se instalaron dos medidores de precipitación Hobo, uno fuera de la plantación y otro bajo los árboles, con el fin de estimar la interceptación del agua por el follaje. El pluviómetro bajo el follaje fue adaptado para contar con datos espacialmente más representativos (Foto 3C). El resto de pluviómetros fueron instalados en un sistema de tubo al aire libre (Foto 3D) que permitió medir la lámina de precipitación acumulada.



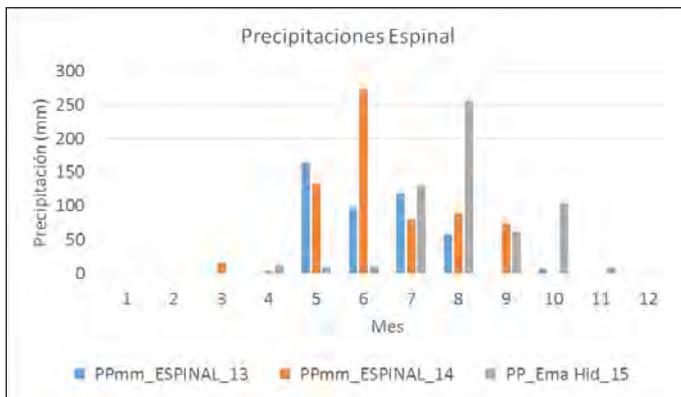
**Foto 3.** Pluviómetro con registrador. A: Data logger y sistema de balancín. B: Balde que recibe la lluvia. C: Adaptación para uso bajo bosque, D: Adaptación al aire libre.

### 5.3 COMPORTAMIENTO ESTACIONAL DE LAS LLUVIAS Y ESCORRENTÍA EN LAS MICROCUENCAS DEL SECANO

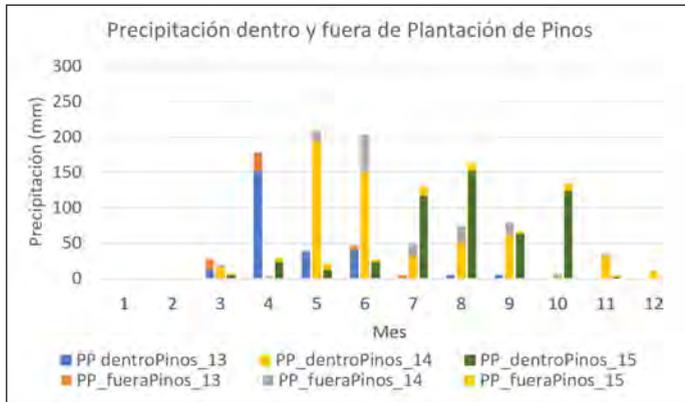
Las aguas superficiales que escurrieron por los esteros o ríos en la zona del estudio, presentaron un comportamiento estacionalmente intermitente (seco en verano) y también discontinuo entre eventos (seco entre eventos de precipitación), siguiendo el patrón de las precipitaciones (Figuras 4; 5 y 6).



**Figura 4.** Distribución mensual de la precipitación en la cuenca con cobertura de pradera, Hidango, Litueche, para los años 2013, 2014 y 2015.

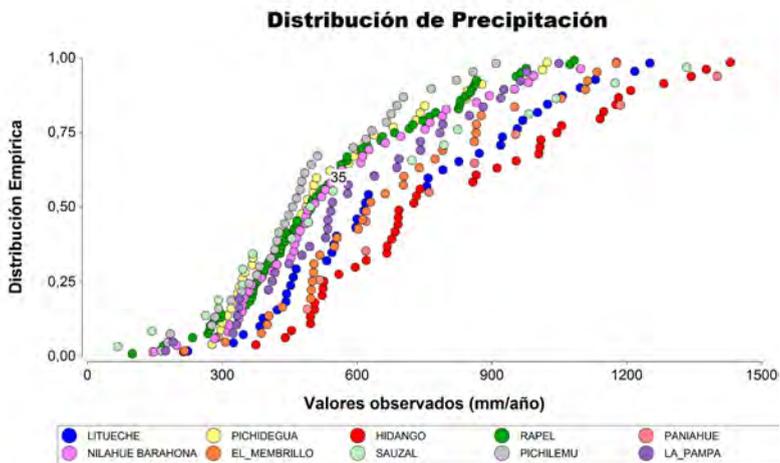


**Figura 5.** Distribución mensual de la precipitación en la cuenca con cobertura de espinales, Hidango, Litueche, para los años 2013, 2014 y 2015.



**Figura 6.** Distribución mensual de la precipitación en la cuenca con cobertura de pinos, sector El Calvario, Paredones, para los años 2013, 2014 y 2015. Se presenta precipitación total (fuera de plantación) y dentro la plantación (descontando la intercepción por el follaje).

El nivel de lluvia del periodo 2013-2015 fue bajo en comparación a las estadísticas de la zona. En la Figura 7 se muestra un gráfico de las estadísticas de diez estaciones de la zona. El eje de las abscisas (X) corresponde a la lluvia en mm/año, mientras el eje de las ordenadas (Y) es la distribución de las lluvias.



**Figura 7.** Gráfico de la distribución de precipitaciones anuales para diez estaciones meteorológicas de la zona.

Para entender mejor la aplicación del este gráfico consideremos la estación Hidango (verde) y los datos de la Tabla 2.

**Tabla 2.** Precipitaciones anuales de la estación Hidango durante el periodo en estudio y precipitación promedio histórica de la misma estación.

Año	Precipitación (mm/año)	%
2013	524	22
2014	740,5	60
2015	611,8	33
Prom. 1972-2015	797,73	

Se puede observar que en el año 2013 la lluvia anual fue de 524 mm. Si se busca este valor en el eje X del gráfico de la Figura 7 y luego se traza una línea vertical (seguir la flecha) hasta encontrar los puntos verdes correspondientes a la distribución estadística de Hidango y finalmente se traza una línea horizontal hacia al eje Y, se ve que llega a un punto que marca 0,22 (22% de probabilidad). Esto significa que el año 2013 la lluvia tuvo un nivel tal que el 22% de los años han ocurrido lluvias menores y el resto de los años (78%), han ocurrido lluvias mayores.

El mismo procedimiento se puede realizar para los años 2014 y 2015. Observe que el año 2014 corresponde a 0,6, así aproximadamente el 60% de los años ha llovido menos que el 2014 y el 40% restante ha llovido más. Es decir, el año más lluvioso considerado en el estudio corresponde a un año algo mayor que el promedio. Por otra parte el año 2015 presentó una condición intermedia 33% de probabilidad.

Este patrón se mantiene para toda el área de estudio, indicando que las lluvias fueron bajas, dato que debe ser considerado al momento de sacar conclusiones.

En relación a la distribución estacional de las lluvias se puede decir que se concentraron durante los meses de invierno y la escorrentía presentó un retardo de 100 a 200 mm de precipitación en las microcuencas, dependiendo de la intensidad de las primeras lluvias, cobertura vegetal, pendiente y del tipo de suelo. Este comportamiento es concordante con la información de cuencas de mayor tamaño como la del estero Nilahue.

Las Figuras 8, 9 y 10 presentan la precipitación y escorrentía de la cuenca con pradera para los años 2013; 2014 y 2015, respectivamente.

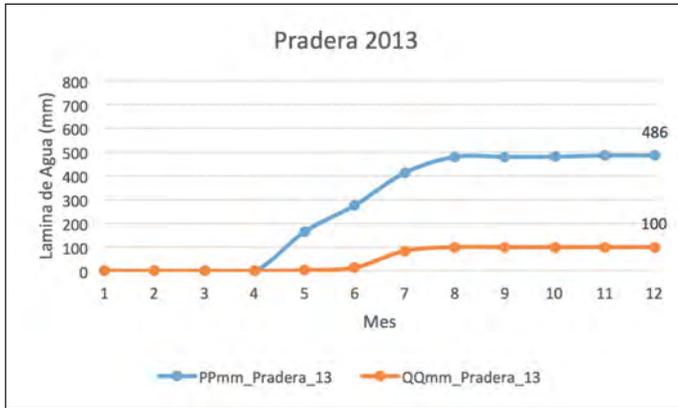


Figura 8. Precipitación y escorrentía acumulada en la cuenca con pradera para el año 2013.

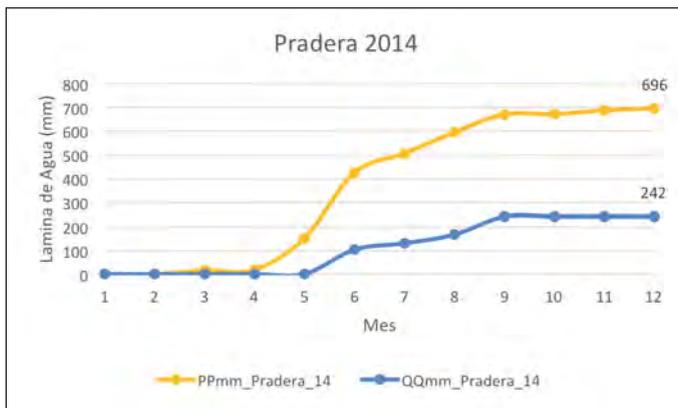
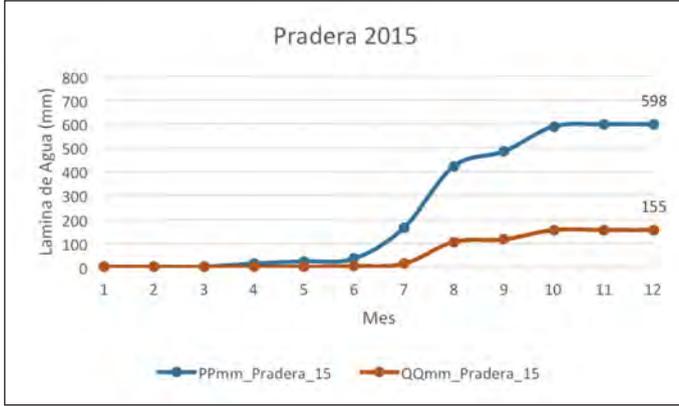


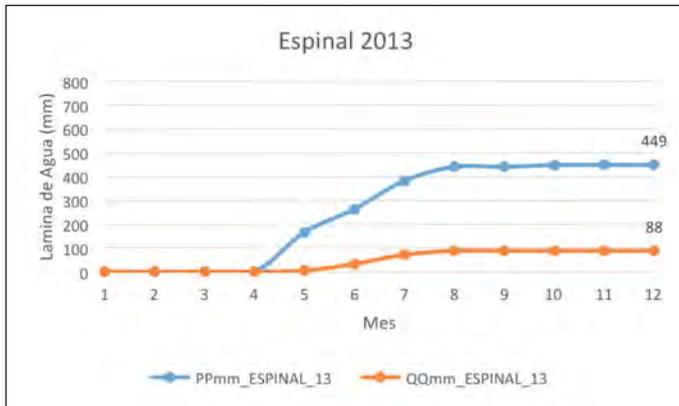
Figura 9. Precipitación y escorrentía acumulada en la cuenca con pradera para el año 2014.



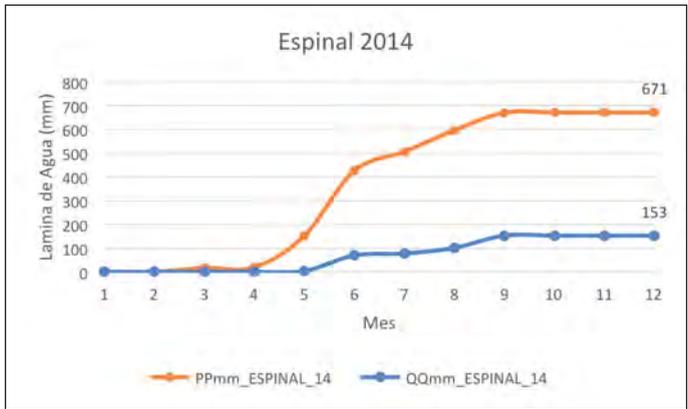
**Figura 10.** Precipitación y escorrentía acumulada en la cuenca con pradera para el año 2015.

El comportamiento de la cuenca cubierta por pradera presentó un coeficiente de escorrentía (CE) de 21%; 35% y 26% para los años 2013, 2014 y 2015, respectivamente. El CE es la relación entre el aguas escurrida y la precipitación para un periodo determinado. Notar que a mayor precipitación acumulada anual, mayor coefiente de escorrentía. Otro punto interesante es que la escorrentía se inicia luego de cierta cantidad de lluvia caída de 174 mm, 153 mm y 178 mm para los años 2013, 2014 y 2015, respectivamente.

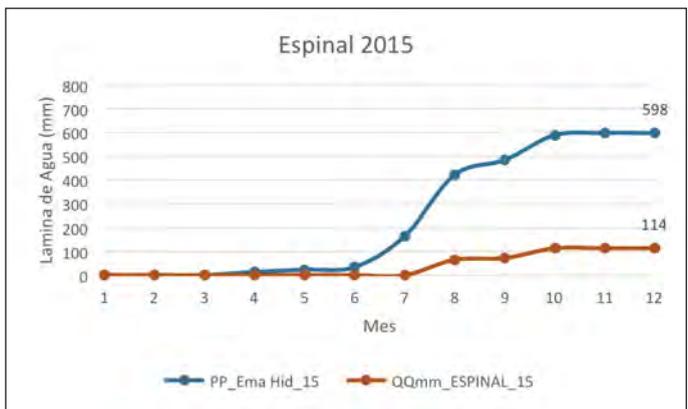
Las Figuras 11, 12 y 13 presentan la precipitación y escorrentía de la cuenca con espinales para los años 2013; 2014 y 2015, respectivamente.



**Figura 11.** Precipitación y escorrentía acumulada en la cuenca con espinal para el año 2013.



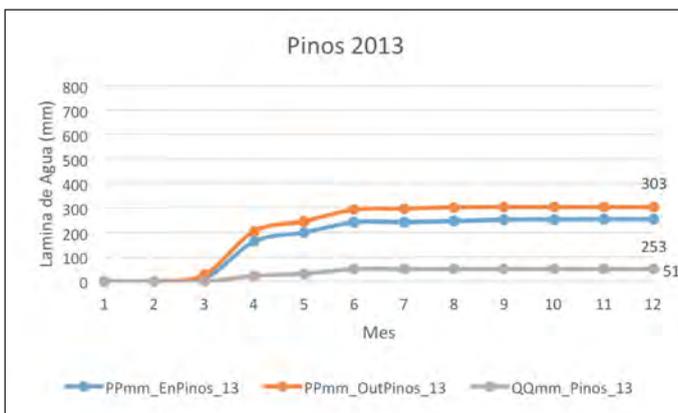
**Figura 12.** Precipitación y escorrentía acumulada en la cuenca con espinal para el año 2014.



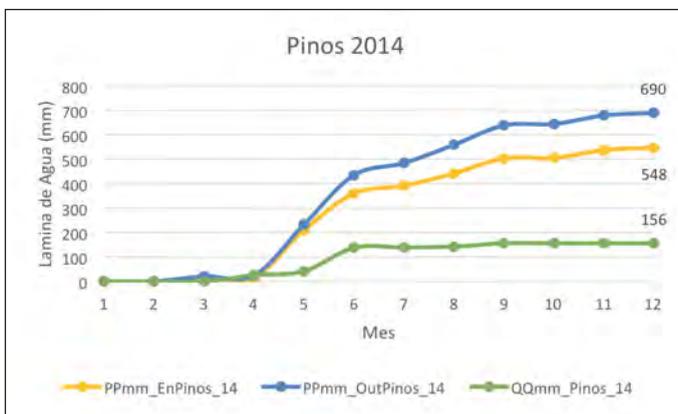
**Figura 13.** Precipitación y escorrentía acumulada en la cuenca con espinal para el año 2015. EmaHid\_15 es estación meteorológica automática de Hidango, año 2015.

El comportamiento de la cuenca cubierta con espinal presentó un coeficiente de escorrentía (CE) de 20%; 23% y 19% para los años 2013, 2014 y 2015, respectivamente. En esta condición de cobertura y cuenca de baja pendiente los CE fueron similares para los tres años. Otro punto interesante es que la escorrentía se inicia luego de cierta cantidad de lluvia caída de 175 mm, 153 mm y 184 mm para los años 2013, 2014 y 2015, respectivamente. Los valores del inicio del escurrimiento de agua fueron muy similares a los de la cuenca con pradera, que se encuentra a pocos kilómetros de distancia.

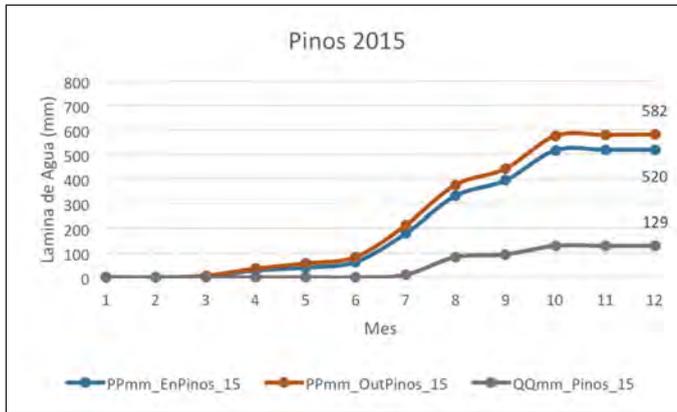
Las Figuras 14, 15 y 16 presentan la precipitación, precipitación bajo los árboles, es decir, descontando la intercepción del agua por el follaje, y la escorrentía superficial de la cuenca con pinos adultos para los años 2013; 2014 y 2015, respectivamente.



**Figura 14.** Precipitación, precipitación bajo los árboles (descontada la intercepción) y escorrentía acumulada en la cuenca con pinos para el año 2013.



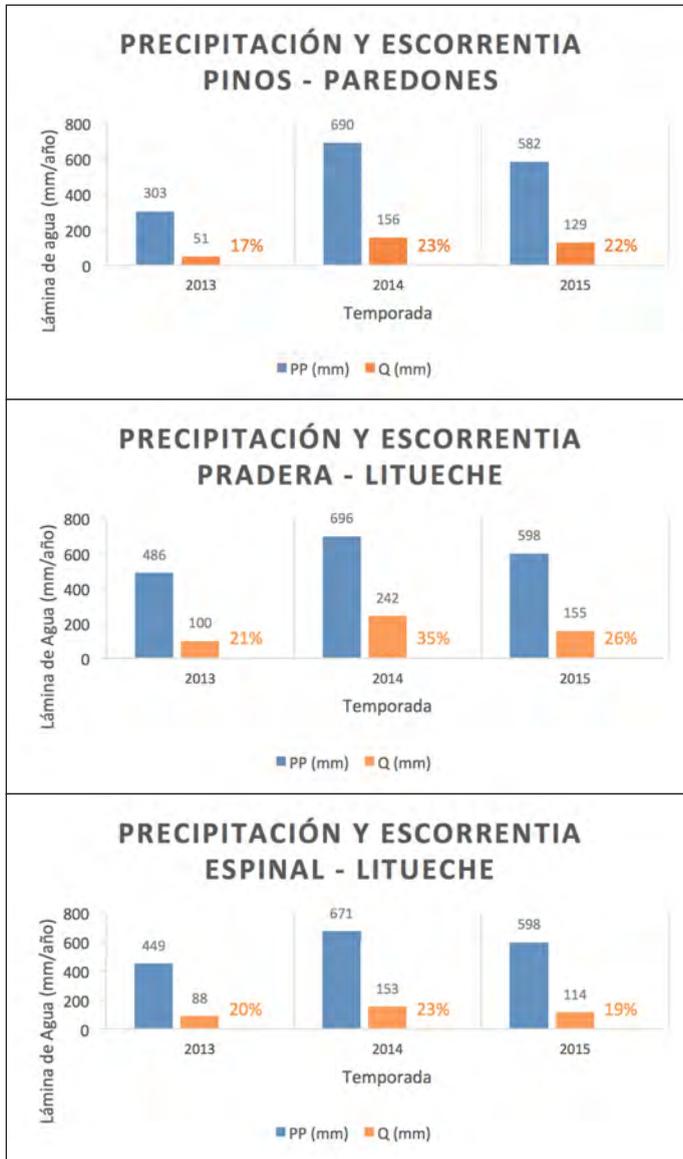
**Figura 15.** Precipitación, precipitación bajo los árboles (descontada la intercepción) y escorrentía acumulada en la cuenca con pinos para el año 2014.



**Figura 16.** Precipitación, precipitación bajo los árboles (descontada la interceptación) y escorrentía acumulada en la cuenca con pinos para el año 2015.

La cuenca cubierta con plantación de pinos adultos presentó un coeficiente de escorrentía (CE) de 17%; 23% y 22% para los años 2013, 2014 y 2015 respectivamente. Por otra parte la interceptación medida fue de 15%, 21% y 11% para los años 2013, 2014 y 2015. Esta es una cuenca de alta pendiente y los CE fueron relativamente bajos, amortiguados por la cobertura de los árboles. La escorrentía se inició luego de cierta cantidad de lluvia caída de 160 mm, 198 mm y 227 mm para los años 2013, 2014 y 2015, respectivamente. Los valores del inicio del escurrimiento de agua fueron retardados respecto de las cuencas con pradera y espinal, que se encuentran en condiciones diferentes.

La Figura 17 resume los datos anuales para las tres condiciones de cobertura vegetal y los tres años del estudio. Los coeficientes de escorrentía encontrados fueron relativamente bajos en comparación con otras mediciones realizadas en el secano de la Región del Biobío, sin embargo se debe destacar que los años 2013; 2014 y 2015 fueron años secos, todos bajo la precipitación media de la zona. Para años más lluviosos se podría esperar coeficientes de escorrentía mayores.



**Figura 17.** Resumen de datos anuales para las tres condiciones de cobertura vegetal y los tres años del estudio.

## 5.4 CUANTIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUS LIMITACIONES

Como se mencionó anteriormente, sólo un porcentaje de la lluvia se transforma en escorrentía superficial, la cual podría eventualmente ser acumulada en embalses. Considerando la información de precipitación medida durante estos años y el escurrimiento medido en las cuencas pequeñas para una condición de poca lluvia se pudo analizar en forma general la condición de las cuencas con respecto a la disponibilidad de aguas para embalses.

Se tomó el año 2013, que fue el más seco de los tres medidos, como base para el análisis. Como se dijo previamente, la precipitación del año 2013 en Litueche corresponde a aproximadamente a una probabilidad de 22%. Esto significa que 78 de 100 años serán más lluviosos que el 2013 y el volumen de agua generado este año tendría una seguridad mayor al 75%.

Aunque este año, 2013, fue muy seco, se generó escorrentía superficial en los esteros, por lo cual es posible acumular agua. La pregunta es: ¿Cuánta?

Las cuencas evaluadas cubiertas con pinos, espinal y pradera tienen un área de 7; 13 y 8 ha, (Tabla 1). La cuenca con espinos es plana, mientras que las otras presentan pendiente fuerte.

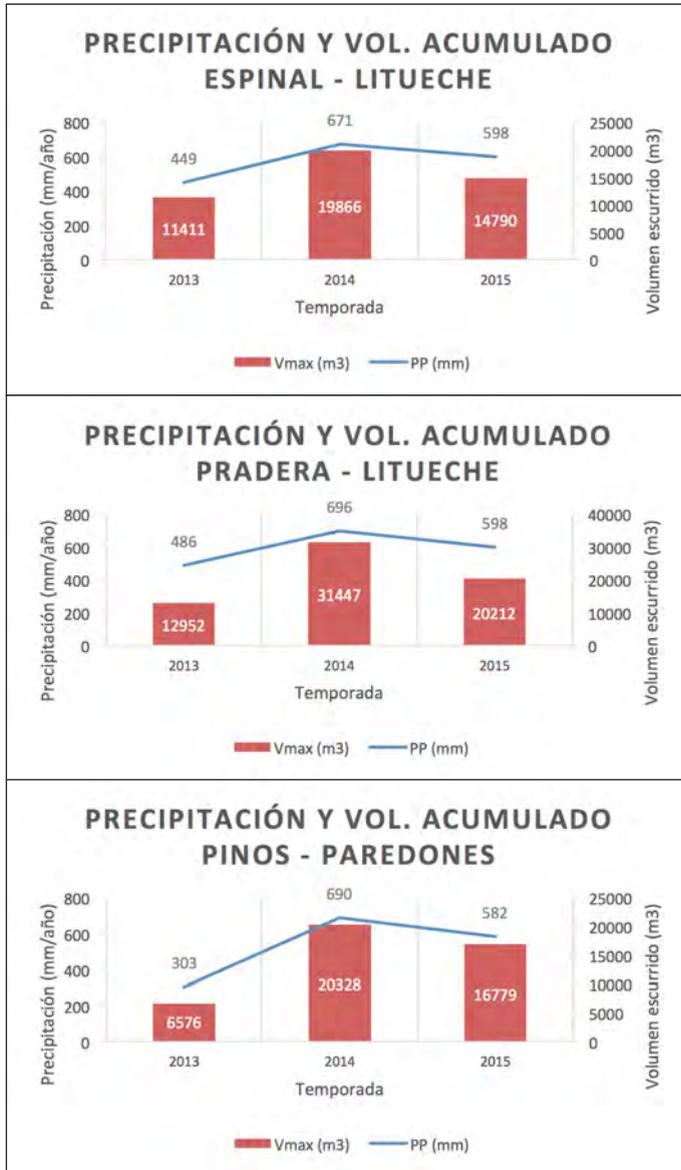
La Figura 18 presenta los gráficos que comparan los volúmenes de agua generados en las cuencas con diferentes coberturas vegetales para los años 2013; 2014 y 2015. El año 2013 es de interés porque representa un nivel de seguridad de riego cercana a 75%.

Se debe tener en cuenta que las cuencas con pradera y pinos son comparables por presentar pendientes fuertes y áreas similares, de 7 y 8 ha. Por otro lado la cuenca cubierta con espinales es plana y tiene una superficie que duplica las anteriores.

En años con poca lluvia, como el 2013, la cobertura con pinos afectó fuertemente la capacidad aportante en relación a pradera, alcanzando algo más de 50% de volumen acumulado de ésta. Esto es explicado en parte por la intercepción, que juega un rol importante, que se acentúa con bajos niveles de lluvia.

Otro punto interesante es que el año 2013 la pradera acumuló una cantidad de agua similar que la cuenca cubierta con espinal, claro que en la mitad de superficie.

Una cuenca pequeña cubierta con pradera podría aportar entre 25% y 50% más agua que una cubierta con pinos, bajo niveles de lluvia promedio. En años secos la cuenca con pradera podría aportar el doble.



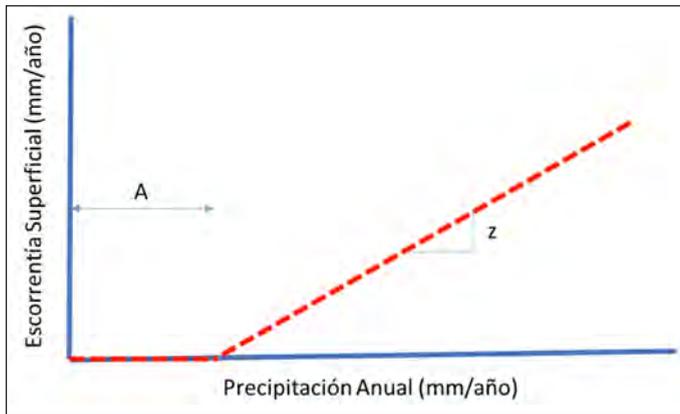
**Figura 18.** Resultados anuales de volumen de escurrimiento en relación a las precipitaciones para las tres condiciones de cobertura vegetal y los tres años del estudio.

## 5.5 MODELO DE PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA PARA EL SECANO DE LA REGIÓN DE O'HIGGINS

De acuerdo a los datos obtenidos y otros antecedentes del equipo de trabajo se ha logrado definir un modelo simple de precipitación-escorrentía para el secano (Figura 19).

Este modelo indica que existe un umbral de precipitación A, antes del cual no se produce escurrimiento. A partir del umbral, el nivel de escorrentía anual es proporcional a la lluvia acumulada anual, con una pendiente constante Z (figura 19).

El parámetro A tiene relación con la capacidad del suelo para retener las primeras lluvias, que lo encuentran seco. La pendiente Z representa el comportamiento de las cuencas frente a las lluvias, una vez que el suelo está saturado, o al menos con alto nivel de humedad. La pendiente Z podría ser mayor en cuencas con alta pendiente, en suelos con arcillas expansivas, que al estar húmedos reducen su capacidad de infiltración, coberturas vegetales que no retienen agua en forma de intercepción. Por otro lado, plantaciones forestales y prácticas como subsolado podrían reducir el valor de z.



**Figura 19.** Modelo de precipitación-escorrentía para el secano.

Si bien existen pocos años de datos para cuantificar con exactitud la escorrentía anual en base a las precipitaciones según cobertura vegetal, pendiente de la cuenca y/o tipo de suelo, se puede formular una ecuación general para determinar volúmenes en diseño de tranques pequeños, para el secano.

Se debe estimar estadísticamente una lluvia anual de diseño con cierta probabilidad de ocurrencia. Luego este valor puede ser usado en la siguiente ecuación:

$$E = (P - A) * Z \quad (1)$$

Donde:

E	Escorrentía superficial Anual (mm)
P	Precipitación Anual (mm)
A	Umbral (150-200)
Z	Pendiente (0.3-0.4)

La ecuación 1 puede ser usada, pero siempre con precaución puesto que los valores de A y Z podrían variar en distintas condiciones.

Para calcular el volumen anual escurrido que podría ser acumulado se debe conocer el área de la cuenca.

$$V = E * S * 10 \quad (2)$$

Donde:

V	Volumen anual (m <sup>3</sup> )
E	Escorrentía superficial Anual (mm)
S	Superficie de la cuenca (ha)

