

# ANÁLISIS DE LA PRESIÓN HÍDRICA POR MEDIO DE LA DENSIDAD DE KERNEL Y SU EVOLUCIÓN ENTRE 1986 Y 2016, EN EL VALLE DE AZAPA, CHILE

Oliver Meseguer-Ruiz y José A. Paillacán

## RESUMEN

*El Valle de Azapa es un área agrícola ubicada en el norte de Chile que, desde 1996, presenta una prohibición para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento de agua subterránea. Pero a pesar de esto, hasta el año 2016 se han constituido y regularizado estos derechos, debido a la gran cantidad de demandas derivadas del crecimiento urbano de la ciudad de Arica y de los cambios en los usos del suelo agrícola, que han tendido hacia actividades que demandan una mayor cantidad de agua. El objetivo del presente trabajo es determinar cómo el Código de Aguas de 1981 y los cambios en las normativas marcaron la evolución de la presión hídrica*

*en el área de estudio, a partir de la información obtenida del catastro Público de Agua y de trabajo de campo, considerando los caudales solicitados, los nuevos derechos otorgados y la concentración de pozos de extracción de agua. A partir de esta información de base, se aplicó la densidad de kernel para mostrar el aumento de esta presión en el valle, evidenciando una zona histórica de mayor presión en la zona baja, coincidente con el área de mayor presión de usos urbanos (hasta aproximadamente el km. 6), que se ha expandido paulatinamente en años siguientes por todo el área, llegando a sectores de la parte alta, varios kilómetros más al interior.*

## Introducción

El Valle de Azapa se localiza en la Región de Arica y Parinacota, en el norte de Chile. Tiene una superficie aproximada de 5000ha cultivables, de la cual solo una parte es utilizada para la agricultura. En el último tiempo, el Valle de Azapa ha experimentado un gran crecimiento en la actividad agrícola, convirtiéndose en uno de los principales ejes de desarrollo económico de la Región, lo cual tiene como consecuencia una sobreexplotación sobre el acuífero de este valle y los recursos hídricos que lo sustenta. Esta situación se contextualiza en el panorama nacional, en el cual, debido al fuerte crecimiento económico que ha conocido el país desde

1990, ha tenido lugar un aumento de la demanda de agua por el desarrollo de actividades económicas como la agricultura (DGA, 2009). Actualmente, en algunas zonas del país existe una explotación intensiva del agua subterránea, la que puede provocar el deterioro de su calidad química por diferentes causas, entre ellas la intrusión salina, contaminación difusa, drenajes salinos, etc. Además, la intensidad de la reutilización del recurso implica el deterioro de la calidad del agua de recarga a los acuíferos, incorporándose elementos potencialmente perjudiciales, tales como fertilizantes, pesticidas, metales o elementos procedentes de la lixiviación de suelos. A lo anterior se suma que el acuífero del Valle de Azapa constituye la

principal fuente de agua de uso doméstico para la ciudad de Arica, la que cuenta con un núcleo urbano de 213.000 habitantes (DGA, 2015) y su explotación llevó en 1996 a declarar la zona con prohibición para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento (ND) dentro del acuífero.

Los problemas y conflictos asociados a la disponibilidad hídrica se deben a un conjunto de factores, tanto por la condición desértica de la región como por el crecimiento de las actividades productivas que requieren del agua para su desarrollo (DGA, 2015). La extrema aridez presente en el Valle de Azapa condiciona la disponibilidad de aguas superficiales durante todo el año. En época estival es donde se ven los

mayores escurrimientos por parte del río San José con las crecidas producidas por las lluvias que se concentran en la parte alta de la cuenca. Debido a que no existe una disponibilidad de aguas superficiales durante todo el año, la agricultura del sector se sustenta en gran mayoría en la extracción de aguas subterráneas como el trasvase Lauca desde 1962, pero con la creación del Canal Lauca se posibilitó la ampliación del suelo agrícola cultivado permitiendo incorporar alrededor de 3200ha al uso agrícola.

En 1981 entró en funcionamiento el nuevo Código de Aguas que permitió privatizar la propiedad del agua, lo que separó el agua del dominio de las tierras para posibilitar su

**PALABRAS CLAVE / Actividad agrícola / Densidad de Kernel / Presión hídrica / Valle de Azapa /**

Recibido: 23/01/2019. Modificado: 23/05/2019. Aceptado: 29/05/2019.

**Oliver Meseguer-Ruiz.** Geógrafo, Universidad de Alicante, España. Magister en Planificación Territorial y Gestión Ambiental, Magíster en Climatología Aplicada y Doctor en

Geografía, Planificación Territorial y Gestión Ambiental, Universidad de Barcelona, España. Profesor, Universidad de Tarapacá, Chile. Dirección: Departamento de Ciencias

Históricas y Geográficas, Facultad de Educación y Humanidades, Universidad de Tarapacá. Av. 18 de septiembre 2222, Arica, Chile. e-mail: ome-seguer@academicos.uta.cl.

**José A. Paillacán.** Geógrafo, Universidad de Tarapacá, Chile. Profesional, Unidad de Ordenamiento Territorial, Gobierno Regional de Arica y Parinacota, Chile. e-mail: j.paillacanrojas@live.com.

## ANALYSIS OF WATER PRESSURE THROUGH KERNEL DENSITY AND ITS EVOLUTION BETWEEN 1986 AND 2016, IN THE AZAPA VALLEY, CHILE

Oliver Meseguer-Ruiz and José A. Paillacán

### SUMMARY

*The Azapa Valley, located in Northern Chile is, since 1996, an area where the establishment of new rights of water use is prohibited, due to the increased extraction of groundwater. Despite this, until 2016 these rights have been established and regularized, due to the large number of demands arising from the urban growth of the city of Arica and the changes in agricultural land uses, which have tended towards the demand of a greater amount of water. The objective this paper is to determine how the Water Code of 1981 and the changes in regulations determined the evolution of water pressure in the study area, based*

*on information obtained from the Public Water Register and field work, considering the flows requested, the new rights granted and the concentration of water extraction wells. Based on this basic information, kernel density was applied to show the increase of this pressure in the valley, evidencing a historical zone of greater pressure in the lower zone, coinciding with the area of greatest pressure of urban uses (up to approximately km. 6), which has gradually expanded in subsequent years throughout the area, reaching sectors of the upper part, several kilometres more inland individual's social and psychological wellbeing.*

## ANÁLISE DA PRESSÃO DA ÁGUA ATRAVÉS DA DENSIDADE DE KERNEL E SUA EVOLUÇÃO ENTRE 1986 E 2016, NO VALE DE AZAPA, CHILE

Oliver Meseguer-Ruiz e José A. Paillacán

### RESUMO

*O Valle de Azapa é uma área agrícola localizada no norte do Chile que, desde 1996, apresenta uma proibição para a constituição de novos direitos para o uso das águas subterrâneas. Mas, apesar disso, até 2016 esses direitos foram estabelecidos e regularizados, devido ao grande número de demandas decorrentes do crescimento urbano da cidade de Arica e às mudanças nos usos da terra agrícola, que tenderam a que exigem uma quantidade maior de água. O objetivo deste trabalho é determinar como o Código de Águas de 1981 e as mudanças nas regulamentações determinaram a evolução da pressão da água na área de estudo*

*com base nas informações obtidas do Registro Público de Água e trabalho de campo, considerando os fluxos solicitados, os novos direitos concedidos e a concentração dos poços de extração de água. Com base nessa informação básica, a densidade Kernel foi aplicada para mostrar o aumento dessa pressão no vale, evidenciando uma zona histórica de maior pressão na zona inferior, coincidindo com a área de maior pressão de usos urbanos (até aproximadamente km. 6), que se expandiu gradualmente nos anos subsequentes em toda a área, atingindo setores da parte superior, vários quilômetros mais para o interior.*

libre compra y venta, viendo al agua como un bien de uso público y al mismo tiempo como un bien de consumo que se puede arrendar, vender y comprar, permitiendo nuevas condiciones de consumo para el Valle de Azapa. En 1995 quedó de manifiesto la sobreexplotación que se suscitaba en el acuífero del valle por el descenso de los niveles freáticos desde 1977, explicado por la extracción excesiva de agua subterránea. Considerando esta situación desfavorable para el valle, en 1996 la Dirección General de Aguas (DGA), en base a la resolución DGA N°202, declaró esta zona como zona de prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterránea, dado que los niveles de explotación

del acuífero excedían la condición de equilibrio a largo plazo, la cual se estima en 700 l/s (CNR, 2008). A pesar de la prohibición de nuevas explotaciones de aguas subterráneas, el consumo del recurso fue creciendo. Es así como AC Ingenieros Consultores (2009) plantea que existen 3540 l/s en derechos de aprovechamiento, distribuidos por toda la cuenca del río San José en derechos de agua, lo que supera ampliamente la recarga total del acuífero de unos 700 l/s.

Estas zonas áridas deben ser entendidas como zonas donde el agua se presenta como el recurso limitante del desarrollo, tanto económico como urbano (Ataburuaga, 2004). Para el Valle de Azapa, esta

condición es relevante ya que no existen recursos superficiales disponibles durante todo el año, respondiendo a las demandas mediante el uso de las aguas subterráneas. El crecimiento de la agricultura en zonas áridas se ha sustentado en la extracción de aguas subterráneas debido a su bajo costo y fácil accesibilidad (Sahuquillo Herráiz, 2009). El costo de la extracción de aguas es menor con el desarrollo de embalses y canales. En el norte de Chile el recurso hídrico no se encuentra distribuido de forma homogénea, debido a las diferentes condiciones climáticas que varían de norte a sur y a las condiciones físicas, donde la escasez de precipitaciones hace que el papel de las aguas

subterráneas, cobren gran relevancia. En esta zona, la explotación de acuíferos se utiliza para el abastecimiento de la demanda de agua para el sector agrícola, y también industrial, principalmente minero (Salazar, 2003). El uso eficaz de las aguas se concentra en la agricultura, pero con efectos negativos como son la lixiviación de sales al suelo y la incorporación de fertilizantes y pesticidas. Esto se ve reflejado en el Valle de Azapa, donde ha aumentado progresivamente la salinidad de las aguas subterráneas a medida que se han incorporados más suelos para al desarrollo de la actividad agrícola (Brow y Saldívia, 2000).

En la actualidad, entre 250 y 300ha son regadas habitual-

mente con aguas subterráneas y, eventualmente, se puede llegar a 550 o 600ha. Cerca del 60% de los pozos en explotación que destinan su uso al riego abastece áreas pequeñas (<5ha), mientras que un 40% es utilizado para abastecer predios de superficie >5ha. La consultora IPLA realizó un análisis a nivel de cuenca (IPLA, 1996) en donde definió una disponibilidad total de 600 l/s de agua subterránea. El estudio menciona que las demandas de la población, así como las de las industrias, se abastecen mediante captaciones subterráneas. Éstas son limitadas en su extracción, deduciéndose que el balance en el valle es muy precario y su desarrollo está limitado directamente por la disponibilidad de recurso hídrico. En el informe de AC Ingenieros Consultores (2009) se observa cómo, desde 1997, el caudal de extracción en el valle superó los 800 l/s; no obstante, en el año 2001 la extracción de agua por parte de la Empresa de Servicios Sanitarios de Tarapacá S.A disminuyó considerablemente al entrar en operación los sondajes construidos por esa empresa en el Valle de Lluta, disminuyendo el caudal extraído en el Valle de Azapa. La misma empresa en el año 2009 realizó una simulación de las recargas de aguas subterráneas para el Valle de Azapa, que dió como resultado que estas recargas del acuífero alcanzarían los 700 l/s.

En la Tabla I se muestran los derechos existentes sobre las aguas subterráneas. Existen 3540,6 l/s en derechos de aprovechamiento constituidos, distinguidos entre Nuevos Derechos, regularizados en los

diferentes transitorios y por el cargo de reserva de Comunidad de Aguas del Canal de Azapa (COMCA), lo que supera la recarga total del acuífero, de 700 l/s. Estos datos no permiten diferenciar por tipo de uso, ya que el Código de Aguas no lo exige.

La responsabilidad principal de la gestión del agua y de la implementación del Código de Aguas recaen en la DGA, servicio inserto del Ministerio de Obras Públicas (MOP), ente no sectorial e independiente de los sectores de usuarios y que no ejecuta por sí mismo obras de aprovechamiento. Este hecho ha permitido que se pueda tener una visión desde los distintos sectores lo que se hace del agua. Por otro lado, sus funciones de gestión y planificación son nominalmente de policía y vigilancia, en la práctica muy limitadas, y sus capacidades de implementación de programas de uso múltiple son reducidas (Dourojeanni y Jouravlev, 2001).

#### Código de Aguas

Con la implementación del Código de Aguas de 1981, que tiene un gran sesgo pro mercado, se fortalecieron los conceptos de propiedad privada, permitiendo que cualquier privado pueda pedir nuevos derechos de agua. Para esto, el Código estableció la reasignación de los recursos mediante la libre transferencia de los derechos de aprovechamiento, por lo que se consagra una total libertad para el uso del agua al que se tiene derecho. Como consecuencia, permitió la abertura y un mayor impulso al mercado privado, que tiene como objetivo

principal efectuar una asignación eficiente del recurso hídrico entre los distintos sectores de la economía (Donoso Harris, 2003). Esta reasignación se efectúa a los precios del mercado, que señalan el valor del agua en sus distintos usos.

#### Nuevos derechos de aprovechamiento (expediente tipo ND)

Se trata del procedimiento por el cual se constituye un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas en pozos, norias, drenes o punteras. Cualquier persona natural capaz de actuar en derecho por sí o por su representante legal, o una persona jurídica, puede solicitar este derecho. La constitución de nuevos derechos de aprovechamiento para la explotación de aguas subterráneas se centra desde el punto de vista legal y técnico en aspectos concretos definidos en la normativa.

#### Derechos en regularización (expediente tipo NR)

Es un procedimiento por el cual un usuario solicita la regularización de derechos de aprovechamiento de aguas para lograr la inscripción de estos a su nombre, sea que se trata de derechos inscritos a nombre de otras personas, no inscritos, o aquellos que extraen de forma individual de una fuente natural. Estos NR se encuentran contemplados en los artículos 1° y 2° transitorio del Código de Aguas. Este último menciona que los derechos de aprovechamiento inscritos que estén siendo utilizados por personas distintas de sus titulares a la fecha de entrar en vigencia el Código de Aguas de 1981, podrán regularizarse cuando dichos usuarios hayan cumplido cinco años de uso ininterrumpido, contado desde la fecha en que hubieran comenzado a hacerlo (Código de Aguas, 1981).

En el presente estudio se analizó la evolución de la presión sobre el recurso hídrico subterráneo en el Valle de Azapa entre 1986 y 2016, intentando determinar qué cambios en la normativa

permitieron la constitución de ND y en regularización (NR); calculando los diferentes indicadores, densidad de pozos, densidad de caudales solicitados y densidad de caudales otorgados, para los períodos 1986-1996, 1997-2007 y 2008-2016; y estimando la evolución de la presión hídrica a través de sus indicadores.

#### Área de estudio

El Valle de Azapa se localiza entre los 18°29' y 18°35'S y los 69°26' y 70°22'O, en la Región de Arica y Parinacota, Chile. Tiene una superficie aproximada de 5000ha cultivables, de la cual solo una parte (2012, 63ha) es utilizada agrícolamente bajo el régimen de regadío (Aguilar *et al.*, 2015). Se inserta dentro de la cuenca del Río San José, que abarca una superficie de 3000km<sup>2</sup>. Esta cuenca tiene un régimen pluvial con una fuerte recarga de diciembre a marzo debido a las lluvias estivales (Balic, 2015) con cuatro ríos en cabecera (Figura 1).

El agua del río San José corre superficialmente durante la temporada lluviosa y subterráneamente en la temporada seca, apareciendo por vertientes, norias o pozos. En la parte baja del Valle de Azapa no existe la disponibilidad de aguas superficiales durante todo el año. Este río logra desembocar al mar gracias a las lluvias estivales que se generan por encima de los a 2500msnm, en los sectores precordillerano y altioplánico (Ayala y Asociados, 1989). La disponibilidad hídrica es un factor limitante para el desarrollo de la agricultura en el valle debido a que los recursos son reducidos y se concentran en la época estival.

Con el fin de aumentar la seguridad de riego, en 1962 se construyó el Canal Lauca para desviar las aguas del río Lauca y así aumentar la disponibilidad de agua en sectores bajos de la cuenca del río San José (Sandoval, 2003). Esta agua conducida a través de la boca-toma del Canal Azapa permitió regar 3213ha de tierras agrícolas del valle. Debido a esta

TABLA I  
RESUMEN DE LOS DERECHOS DE AGUAS  
SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE AZAPA

Estado de tramitación	Constituidos (l/s)	Pendientes (l/s)
Nuevo Derecho	356,0	-
Regularizados 2° Transitorio	2871,3	-
Regularizados 4° Transitorio	133,3	631,0
Regularizados 6° Transitorio	-	124,0
Cargo reserva COMCA	180,0	-
Total	3540,6	755,0

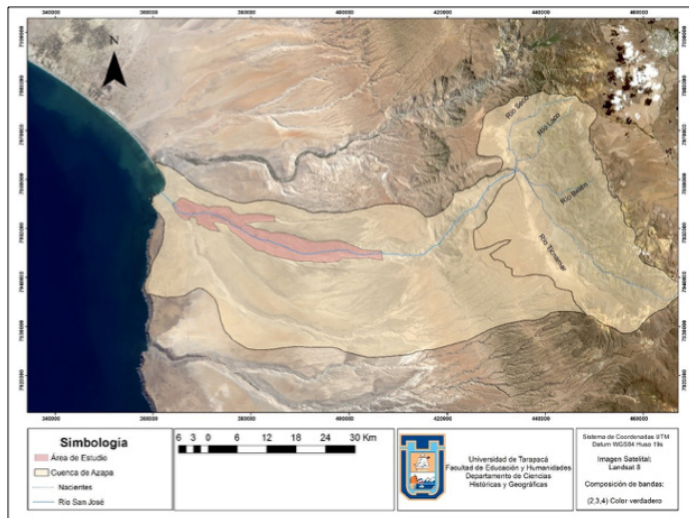


Figura 1. Área de estudio.

disponibilidad hídrica y a la entrega de ND dentro del Valle de Azapa, se ha desarrollado paulatinamente la agricultura, convirtiéndose en una de las principales actividades económicas de la Región con ~3000ha cultivadas. Las óptimas condiciones climáticas permiten el desarrollo de la agricultura durante todo el año, siendo 18°C la temperatura media anual. Dadas estas condiciones el Valle de Azapa se ha convertido en uno de los principales proveedores de hortalizas de la zona central de Chile durante el invierno (Saavedra y Tapia, 2009; González Vallejos *et al.*, 2013). Para el desarrollo de esta investigación se consideraron los primeros 40km del valle, donde se concentra gran parte de los cultivos y derechos de aprovechamiento. La presión hídrica se obtuvo en base a las aguas subterráneas, sin considerar las aguas del canal Azapa, ya que existe una

comunidad encargada de la autogestión de esos recursos hídricos por no ser un curso natural.

### Metodología

#### Creación de una capa de derechos de aprovechamiento ND y NR

Para un mejor manejo de la información recolectada del Catastro Público de Aguas, se generó una base de datos con la información presentada en la Tabla II.

#### Densidad de kernel

Este estimador es un apoyo para el análisis de concentración espacial, en base a los atributos de una capa. Permite convertir puntos en superficie continua (Figura 2), calculada a través de la densidad de puntos alrededor de cada celda ráster de salida (Silverman, 1986; Díaz Caravanes *et al.*,

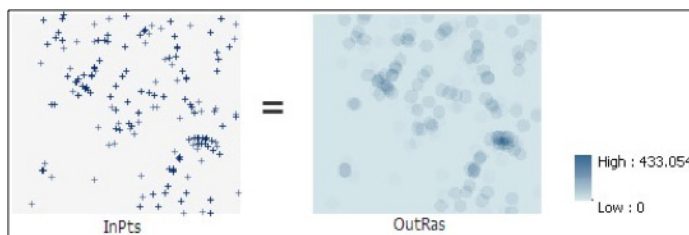


Figura 2. Ejemplo de la densidad de Kernel. Fuente: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/kernel-density.htm>

2013; Díaz-Hormazabal y González, 2016). Se determinan los puntos de densidad en base a los atributos que cada uno contenga, realizando este cálculo en base a los derechos solicitados y derechos otorgados (l/s) y obteniendo un ráster de salida basado en la concentración de puntos (concentración de pozos).

Primero es necesario determinar el radio de búsqueda, que determina la distancia dentro de la cual se totalizarán los valores para obtener la densidad. Cuanto mayor sea el radio se obtendrán patrones más generales (Lara Valle, 2004). Se estimaron esos parámetros en base al ancho del valle, que tiene un promedio de 1,5km. Los radios se fueron insertando hasta encontrar el que mejor se ajusta a la superficie y combinado con una mejor visualización del mapa, en relación a la escala utilizada (Díaz Caravanes *et al.*, 2013; Díaz-Hormazabal y González, 2016). Para determinar el radio se utilizó la fórmula

$$r = \sqrt{\frac{x}{\pi}}$$

donde x: distancia de análisis. Se definió una superficie de 1km<sup>2</sup>, resultando r= 564,19m.

Para este caso se optó por un tamaño de píxel de 10, dado que se perdía el detalle. Esto permitió tener un mejor grado de finura para la representación de áreas (Lara Valle, 2004). Luego de obtener el ráster de densidad se reclasificaron mediante el método de Jenk, que se recomienda cuando no existe una distribución normal de los datos (Díaz Caravanes *et al.*, 2013). Se utilizaron nueve categorías, pero estas no se reclasificaron nuevamente. Para determinar la evolución se obtuvieron tres ráster de los diferentes rangos de año 1986-1996, 1997-2007 y 2008-2015 (concentración de pozos, concentración de caudales y concentración de caudales otorgados). Para estimar la presión hídrica según Díaz Caravanes *et al.* (2013), los ráster resultantes se

combinaron mediante una suma lineal ponderada:

$$dr = \frac{c + p + v}{3}$$

donde dr: densidad resultante, c: cantidad, p: profundidad, y v: volumen.

Dado que la DGA no cuenta con los datos de profundidad para los objetivos de este estudio se modificó la fórmula:

$$dr = \frac{cp + cs + co}{3}$$

siendo cp: concentración de pozo, cs: caudales solicitados, y co: caudales otorgados.

Se entrega como resultado un mapa de densidad combinado de las tres variables, permitiendo tener una aproximación de la presión hídrica del Valle de Azapa, y obteniendo un acercamiento a lo que sucede con las extracciones ilegales al considerar los caudales solicitados por los diferentes usuarios.

### Resultados

#### Cambios en la normativa

Desde su entrada en vigor, el Código de Aguas de 1981 ha sufrido cambios que han afectado directamente al sistema de agua subterránea, siendo uno de los principales el Artículo 2° transitorio, que permitió que los derechos de aprovechamiento que estén siendo utilizados por personas distintas de su titular, derechos no inscritos, y aquellos que se extraen de forma individual de una fuente natural, puedan regularizar su situación cuando estos usuarios hayan cumplido cinco años de uso ininterrumpido, contando los cinco años hacia atrás desde la fecha de entrada en vigor. Esta disposición transitoria se ha mantenido vigente desde 1981 hasta hoy y ha permitido la regularización de derechos de aprovechamiento que se encontraban en supuesto uso desde 1976. La ley 20.017, consagró la reforma más importante realizada hasta el momento al Código de Aguas de 1981; en su Artículo 4° transitorio constituyó derechos considerados preexistentes sobre

TABLA II  
INFORMACIÓN CONTENIDA EN LA BASE DE DATOS

ID	Identificador
X	Coordenadas este, sistema de coordenadas UTM Datum WGS84 huso 19
Y	Coordenadas este, sistema de coordenadas UTM Datum WGS84 huso 19
EXPEDIENTE	Rotulado del expediente DGA
NOMBRE	Nombre de usuario en base a expediente rotulado DGA
LOCAL	Sector de ubicación
FECHAINGRE	Fecha en donde se ingresó la solicitud de constitución o regularización de derechos de aprovechamiento de aguas
LOCALIDAD	Azapa
NAT	Agua subterránea
TIPODEFUENTE	Acuífero
QOT	Caudal otorgado, se agregaron los derechos de aguas que contenían ingreso al Conservador de Bienes Raíces y se conocían su situación judicial
QSOL	Caudal solicitado por el usuario, por lo general siempre es mayor que el caudal otorgado
TIPO CAPTA	Pozo, sondaje o noria
ESTADO_SOL	A= Aprobado A-RR= Aprobado con recurso de reconsideración DES= Desistido P-LEGAL= Pendiente legal RRCL= Recurso reconsideración nivel central P-REG= Pendiente en región P-REG-OP= Pendiente región con oposición
ARTÍCULO	Artículo por el cual ingreso la solicitud de derecho: 2°, 4° y disposiciones transitorias

los derechos de ejercicio permanente construidos hasta el 30 de junio de 2004. Ello permitió entregar ND por un caudal de hasta 2 l/s para la primera región y metropolitana, y hasta 4 l/s en el resto del país.

El artículo 2 de la Ley 20.099 entregó una ampliación de seis meses para la presentación de solicitudes de constitución de derechos de aprovechamiento permanente sobre aguas subterráneas, a partir del 17 de diciembre de 2005 y expiró el 16 de junio de 2006. Algunos autores plantean que gracias a esta modificación lograron ingresar más de 50.000 solicitudes de derechos de aprovechamiento. En el 2009, a través de la ley N° 20.411 se detuvo la entrega de derechos en el Valle de Azapa por parte del 4° transitorio; el hecho de desconocer cuales eran realmente las personas que pertenecían al sector agrícola beneficiado hizo que se desvirtuara la aplicación de este procedimiento permitiendo que desde otros sectores económicos se pudiera acceder también a este beneficio. En el

2010, a través del Dictamen N° 25.837 de la Contraloría General de la República, se definió lo que se considera uso doméstico en relación al artículo 56 inciso 1° del Código de Aguas, actividades que desarrolla un grupo familiar necesarias para su mantención y sustento. Este dictamen hace mención que todas las personas naturales o jurídicas que extraen agua de un pozo destinado a la bebida y uso doméstico de un grupo familiar que desarrolle una agricultura de subsistencia destinada para su autoconsumo y no hace usufructo de los cultivos que se cosechan se insertan dentro de este derecho. El consumo doméstico no es considerado extracción ilegal; para hacer uso de este derecho no es necesario acceder a través de una solicitud de derechos de aprovechamiento y no es obligatorio el registro en el CPA. Esto no ha permitido dimensionar la cantidad de aguas que se utilizan en base al concepto de uso doméstico; por tanto, es imposible determinar de qué forma este tipo

de derecho ya adquirido por ser el agua un bien de uso público ha influido directamente en el aumento de la presión hídrica en el Valle de Azapa.

*Indicadores para los diferentes periodos*

Los indicadores de presión hídrica están resumidos en la Tabla III. Para el periodo 1986-1996, la mayor cantidad de pozos se encuentran en la parte baja del Valle de Azapa, específicamente en los kilómetros 3

y 5, alcanzando 19 pozos/km<sup>2</sup> en cada uno de estos sectores. Desde acá comienza la construcción de pozos en el valle, debido a que en este sector no alcanzaba a distribuir las aguas del Canal Comunidad Azapa que empezó a funcionar en el año 1962. Al inicio no existían las herramientas para realizar pozos de gran profundidad y, en general, la construcción era artesanal. Existía un total de 82 pozos, 51 relacionados con NR y 31 relacionados con ND. La gran cantidad de derechos solicitados en el Valle de Azapa no está directamente relacionada a la cantidad de pozos construidos en la parte baja, la mayor cantidad de caudales solicitados se encuentran en los kilómetros 10 y 6. En la parte periurbana no existen caudales solicitados. Las solicitudes de agua subterránea se concentran a partir de la parte baja del valle. El total de caudales solicitados alcanza los 1448 l/s para este periodo, distribuidos en solicitudes de ND, que alcanzan 825 l/s y de NR que llegan a 623 l/s. Las solicitudes superan en un 207% la recarga natural del acuífero. En el mismo periodo, los caudales otorgados se encuentran concentrados en el km. 6 del área de estudio, alcanzando los 365 l/s·km<sup>2</sup>, lo que representa 55,2% del total de caudal otorgados que es de 661 l/s. Existe en el km. 4 una concentración cercana a los 117 l/s·km<sup>2</sup>, mostrando que en estas dos zonas en general concentrarían el total de caudales otorgados de todo el valle. Esto se debe principalmente a que muchos

TABLA III  
INDICADORES DE PRESIÓN HÍDRICA EN EL VALLE DE AZAPA PARA CADA UNO DE LOS PERÍODOS CONSIDERADOS

Indicador /	Número de pozos	1986-1996	1997-2007	2008-2016
		Totales	82	490
Caudales solicitados	Totales	1448	2786	3548
	NR	623	1095	1857
	ND	825	1691	1691
Derechos otorgados	Totales	660	1008	1070
	NR	405	466	528
	ND	255	542	542

de los pozos que solicitaron NR accedieron a este beneficio, alcanzando un total de 405 l/s. El total de caudales otorgados alcanzó los 660 l/s; no obstante, como se mencionó, estos corresponderían a NR que accedieron a través del artículo 2° transitorio, dado a la antigua data de cada uno de los pozos. Se entregó un total de 405 l/s para los NR y unos 255 l/s para ND.

A pesar de la existencia de una zona de prohibición en el Valle de Azapa en 1996, esto no impidió que se construyeran nuevos pozos en el sector, pasando de los 82 en el periodo 1986-1996 a 490. Este aumento fue impulsado por la ley 20.017 del año 2005, directamente relacionado con el aumento de las solicitudes de aprovechamiento de agua. La implementación de esta ley, en base a su Artículo 4° transitorio permitió acceder a la constitución de ND, que no podían ser mayores a 2 l/s. La concentración de caudales solicitados se encuentra distribuida por todo el valle, existiendo zonas en donde hay una alta concentración de l/s solicitados (kilómetros 4 y 13). Alcanzan una concentración de 542 l/s-km<sup>2</sup>, un 19,45% del caudal total solicitado. Hay que considerar que las solicitudes en este periodo superan en un 398% a la recarga natural del acuífero del Valle de Azapa. El total de caudal solicitado aumentó considerablemente a 2786 l/s de los cuales 1691 l/s correspondían a ND y 1095 l/s a NR. En específico, el artículo 4° transitorio permitió la solicitud de 866 l/s de ND. Hay que considerar que en este periodo perdieron relevancia los NR por el 2° transitorio del Código de Aguas, los que alcanzaron solo 471 l/s, muy por debajo de los ND, que accedían a través del artículo 4° transitorio de la ley 20.017 del 2005. Gracias a este último artículo, aumentó de gran manera la demanda de agua subterránea en el valle de Azapa. Hay que considerar que la expansión agrícola que se fue dando en el valle aumentó la demanda de recurso hídrico bajo la cual se sustentó, por

una parte de forma ilegal y por otra a través de la ley 20.017 del 2005. Los caudales otorgados en el periodo 1997-2007 se concentraron según la tendencia dentro de los kilómetros 4 y 6 del valle; no obstante, hay una creciente concentración de derechos de aprovechamiento otorgados por toda el área de estudio. Las nuevas tendencias de ocupación y de uso de valle de Azapa con la incorporación de áreas agrícolas, provocaron que la concentración de derechos otorgados, no solo se concentrara en la parte baja, sino que con mayor frecuencia en la parte media del valle y empieza a generarse una concentración de derechos otorgados, la que por el momento se mostró sin mayor relevancia.

Estas zonas de mayor concentración, específicamente la del km. 6 alcanza 365 l/s-km<sup>2</sup> lo que representa un 36,18% del caudal otorgado hasta la fecha. Lo importante es que los derechos de aprovechamiento otorgados se encontraban distribuidos en toda el área de estudio; es por este motivo que donde existía mayor concentración ya no alcanzó los 55,2% que esta misma zona representaba en el periodo 1986-1996, ya que el total de caudales otorgado aumentó en base al Artículo 4° transitorio, alcanzando los 1008 l/s. El total de caudales de derechos de aprovechamiento otorgados en el periodo de 1997-2007 fue de 1008 l/s y considerando a los 190 l/s de la reserva de la Comunidad del Canal Azapa, esto llegaría a los 1198 l/s, cifra que está un 171% por encima de los 700 l/s que se estima como recarga natural del acuífero.

En el periodo 2008-2016 no existe gran diferencia respecto al periodo anterior, dado que ya no se pudo perforar pozos en base a la ley 20.017 del 2005. Gracias a este último artículo, aumentó de gran manera la demanda de agua subterránea en el valle de Azapa. Hay que considerar que la expansión agrícola que se fue dando en el valle aumentó la demanda de recurso hídrico bajo la cual se sustentó, por

zando. No existen cambios relevantes en comparación con el periodo anterior, se mantiene la gran concentración de caudales solicitados entre los kilómetros 4, 5, 6, 12 y 17, alcanzando 542 l/s-km<sup>2</sup>, lo que representa en cada una de estas zonas un 15,27% del total solicitado a la fecha. La cantidad de caudales solicitados a la fecha alcanzó los 3548,59 l/s, pero los ND se mantuvieron igual al periodo 1997-2007, dado que para 2006-2009 ya no se permitía constituir ND a través del Artículo 4° transitorio. A pesar de que esta normativa no se encontraba en funcionamiento, aún se regularizaban derechos a través del artículo 2° transitorio, normativa que aún se mantiene vigente desde 1981. Los caudales solicitados a través de este artículo alcanzaron los 1857,37 l/s, aumentando en 471,50 l/s con respecto al periodo anterior. Los derechos otorgados se concentran en la parte baja del Valle de Azapa específicamente en el km. 6, alcanzando una concentración de 406 l/s-km<sup>2</sup>, que representa un 38% de los caudales otorgados a la fecha. Esto se mantuvo dado que los mayores caudales entregados fueron en la parte baja en los periodos de 1986-1996 y, en general, los caudales de los derechos de aprovechamiento en los años siguientes no superaron los 10

l/s, pudiéndose identificar sectores en el Valle de Azapa. La cantidad de caudales otorgados a la fecha alcanzó 1070,70 l/s divididos en 528,57 l/s otorgados a través de los NR y 542,13 correspondientes a ND. El total actual de 1070,70 l/s representa un 153% de la recarga natural del acuífero.

### Aproximación a la presión hídrica

Como se puede observar en la Figura 3, la suma de todos los indicadores para el periodo 1986-1996 resultó en que la mayor presión hídrica se encuentra claramente en el km. 6 del área de estudio. Los sectores cercanos a las laderas de los cerros presentan una presión baja de recursos hídricos para este periodo ya que no existía un uso intensivo para la agricultura de estos suelos. En los kilómetros 12 y 17 una presión baja, debido principalmente al uso de vertientes que se concentraban en esa franja y, por tanto, no existió una presión relacionada a pozos de agua subterránea.

La Figura 4 muestra como aumentó la presión hídrica en la parte baja; los niveles de densidad aumentaron de 636 a 698 unidades para la presión alta, lo que quiere decir que las zonas marcadas en rojo de los kilómetros 6 y 12

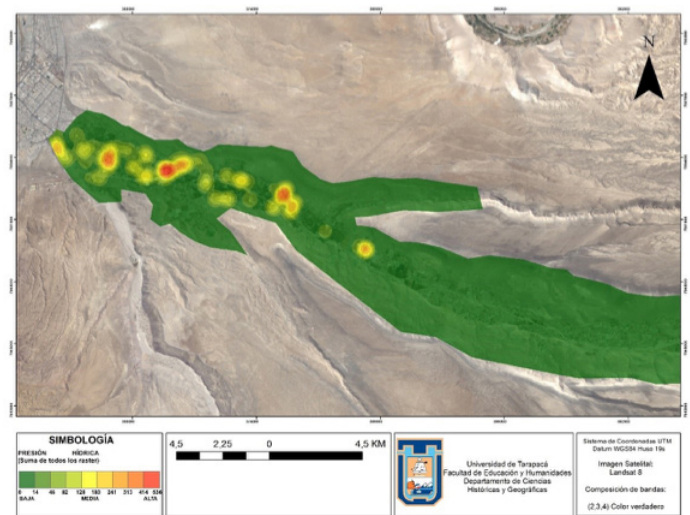


Figura 3. Aproximación de la presión hídrica del periodo 1986-1996.

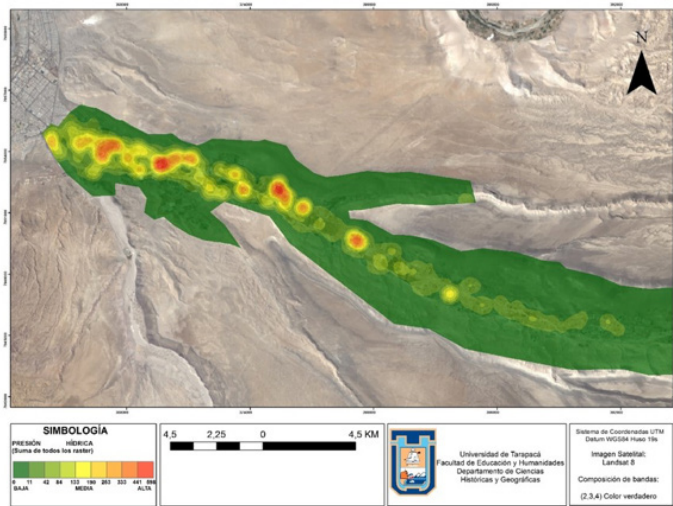


Figura 4. Aproximación de la presión hídrica del período 1997-2007.

significarían un aumento en cuanto a la cantidad de pozos, caudales solicitados y caudales otorgados en ese sector en específico. Se observa como se ha empezado a convertir en una zona con mayor presión hídrica, a diferencia de los años 1986-1996 en donde se encontraba una presión hídrica media. Se puede observar a la vez como se ha extendido a lo ancho y largo del área de estudio la presión hídrica, encontrando pocas zonas del fondo de valle con una baja presión, lo que se relaciona directamente con los derechos de aprovechamiento solicitados a través del artículo 4° transitorio de la ley 20.017 del 2005.

La Figura 5 revela que no existen cambios tan evidentes con el periodo anterior, debido a que en el 2009 cesó la vigencia de la ley 20.017 que permitía la constitución de ND a través del artículo 4° transitorio. A pesar de no estar vigente esa ley, se siguieron regularizando derechos de aprovechamiento a través del Artículo 2° transitorio, lo que afectó a los kilómetros 6 y 7, donde se aprecia que la presión hídrica se ha expandido paulatinamente con relación a los periodos anteriores. Se puede concluir que existe una mayor presión hídrica en los kilómetros 6, 7 y 12, y se ve ya una ocupación de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la

parte alta del área de estudio, lo que mostraría la tendencia futura de los derechos de aprovechamiento.

#### Discusión y Conclusiones

En el transcurso de esta investigación se determinó que existe incertidumbre en cuanto a la cantidad de agua disponible en el acuífero del Valle de Azapa. Ya en 1995 (JICA, 1995) se determinó la existencia de un acuífero no confinado con un almacenamiento de  $302 \times 10^6 \text{ m}^3$ , pero no se refirió una disponibilidad de 750 l/s de la cual muchos autores hacen referencia, lo que se comprueba con lo establecido por IPLA (1996) donde se reconoce que el caudal disponible por parte del acuífero del valle de Azapa alcanza los 600 l/s. El aumento de casi 100 l/s en comparación con los 500 l/s establecidos en 1960, se fundamenta a través de las recargas aportadas por infiltración debido al aumento del área regada y a las pérdidas del Canal Azapa, que entró en funcionamiento en 1962.

Se entregaron derechos de aprovechamiento sin considerar esta variable como un elemento importante para definir la cantidad de agua posible extraer y de entregar a través de pozos y así no superar el caudal disponible del acuífero. Esto explicaría que en 1960 se

determinara que la capacidad total del embalse subterráneo ya había sido aprovechada, lo que produjo una depresión permanente en los niveles estáticos de los pozos, encontrando ya un acuífero sobreexplotado entre los kilómetros 4 y 7 del Valle de Azapa.

En el periodo 1986-1996 los derechos otorgados alcanzaron el total de 661,22 l/s, difiriendo con lo establecido en el año 1989 por Ayala y Asociados (1989), que estimaron la extracción total de aguas a nivel cuenca en 842 l/s. Estos últimos resultados consideran la zona urbana de la ciudad de Arica, por lo que se puede decir que los 180,79 l/s que no se consideran en los resultados obtenidos estarían ubicados en la parte urbana.

AC Ingenieros Consultores (2009) estipuló en 3540,6 l/s el total de derechos otorgados, debido a dos razones: la DGA considera los NR solicitados como parte de los derechos otorgados debido a que se desconoce la situación real en las que se encuentran estos derechos, y a que el total de caudal otorgado considera los derechos que no se encuentran en uso y pertenecen a la Comunidad de Regantes del Canal Azapa, con derechos por 190 l/s.

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran los caudales realmente

otorgados a través de los 2° transitorios gracias a las sentencias ingresadas en la DGA. Así, los caudales otorgados en el periodo 1998-2007 llegan a 1008,70 l/s y en 2008-2016 a 1070,70 l/s, pudiendo ser valores más cercanos a la realidad, sin sobreestimar cifras que escapan de lo que sucede. Estos 3540,6 l/s se acercan más a los derechos solicitados (3548,59 l/s) que se determinaron para el periodo 2008-2016, siendo el segundo mayor por 8 l/s.

AC Ingenieros Consultores (2009) menciona que los nuevos derechos constituidos se concentraron hasta 1996 y luego de esa fecha en general se regularizaron derechos a través del artículo 2° y 4° transitorio, lo que se comprueba claramente. Hay que agregar que los derechos de aprovechamiento a través del 4° transitorio de la Ley 20.107 del 2005 solo se pudieron constituir hasta el 2006, y que hasta el día de hoy el único artículo vigente es el 2° transitorio del Código de Aguas, el que ha permitido que se continúen otorgando derechos de aprovechamiento.

Sahuquillo Herráiz (2009) menciona que el crecimiento de la agricultura en zonas áridas se ha sustentado en la extracción de aguas subterráneas debido a su bajo costo y fácil accesibilidad. Esto se debe a que el costo para la extracción

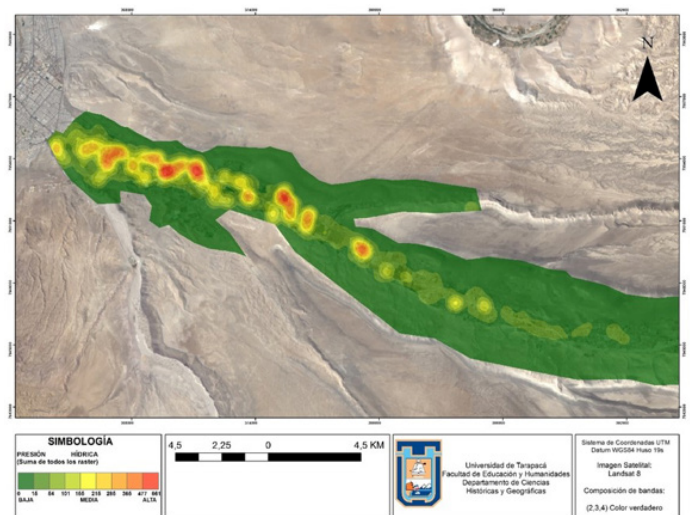


Figura 5. Aproximación de la presión hídrica del período 2008-2016.

de aguas es menor con el desarrollo de embalses y canales, lo que se observó claramente cuando entró en vigencia la ley 20.017 con el artículo 4° transitorio, que buscaba entregar derechos de aprovechamiento a los pequeños agricultores. Igualmente, el Código de Aguas permitió asignar derechos gratis y a perpetuidad.

En los diferentes períodos estudiados se ha visto un aumento de derechos solicitados y otorgados, llegando a representar un 503% y un 153% con respecto a la disponibilidad hídrica del acuífero del Valle de Azapa. Brow y Saldivia (2000) manifiestan que las aguas subterráneas están siendo explotadas a un nivel mayor que sus recargas naturales, que se estimaron para los diferentes períodos. Entre 1986-1996 la cantidad de derechos de aprovechamiento otorgados fue un 661,22 l/s lo que no se cumpliría para este período. Por el contrario, el período 1997-2007 muestra claramente esta tendencia, dándose derechos de aprovechamiento otorgados por un caudal de 1198,70 l/s, que representa un 171% de la recarga natural del acuífero. Durante el período 2008-2016 se otorgaron 1070,70 l/s, lo que representa un 153% de la recarga natural del acuífero, haciendo evidente la ya señalada sobreexplotación. La mayor presión hídrica al día de hoy se concentra en los kilómetros 6, 7 y 12 del área de estudio, la que se ha visto representada en los anteriores períodos. Se puede concluir que la evolución de la presión hídrica en el Valle de Azapa ha sido incentivada por los cambios en la normativa, principalmente los artículos

2° transitorio del Código de Aguas de 1981 y 4° transitorio de la ley 20.017 de 2005, factores que han llevado al aumento de la presión hídrica en el Valle de Azapa, produciendo una sobreexplotación en base a la disponibilidad hídrica que existe en este acuífero. No obstante, la cantidad de derechos de aprovechamiento otorgados será una interrogante que persistirá en el tiempo, dado que desde la implementación del Código de Aguas de 1981 y la integración de estos derechos al mercado del agua, no ha permitido el buen seguimiento de los derechos de aprovechamiento que se mueven dentro de la misma cuenca.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Aguas por la cesión de los datos. También se agradece al Proyecto UTA-Mayor 5774-19 por financiar el desarrollo de esta investigación.

#### REFERENCIAS

AC Ingenieros Consultores (2009) *Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región. Resumen Ejecutivo*. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 7 pp.

Aguilar C, Röper C, Mazuela P, Torres A (2015) Tenencia de tierra y aguas de pequeños y medianos agricultores del valle de Azapa, Arica, Chile. *Idesia* 33(4): 105-110.

Ataburuaga R (2004) El agua en la zona áridas de Chile. *ARQ (Santiago)* 57: 68-72.

Ayala y Asociados Ingenieros Consultores (1989) *Modelo de Simulación de las Aguas Subterráneas del Valle de*

*Azapa*. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 409 pp.

Balic I (2015) *Modelación Numérica de los Efectos de la Variabilidad Climática sobre la Utilización Sustentable del Acuífero de la Cuenca del Río San José, Arica*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 74 pp.

Brow E, Saldivia J (2000) *Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Chile*. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 116 pp.

CNR (2008) Especial Región Arica y Parinacota. *Revista Chile Riego* 34. 61 pp.

DGA (2009) *Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos*. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 194 pp.

DGA (2015) *Análisis Integral de Soluciones a la Escasez Hídrica, Región de Arica y Parinacota*. Dirección Regional de Aguas Región de Arica y Parinacota. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 591 pp.

Díaz Caravanes RE, Bravo Peña LC, Altorre Cejudo LC, Sanchez Flores E (2013) Presión Antrópica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Inv. Geogr.* 82: 93-103.

Díaz-Hormazabal I, González ME (2016) Análisis espacio temporal de incendios en la región del Maule, Chile. *Bosque* 37: 147-158.

Donoso Harris G (2003) *Mercados de Agua: Estudio de Caso del Código de Aguas de Chile de 1981*. Global Water Partnersip South America. Departamento de Economía Agraria, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 81 pp.

Dourojeanni A, Jouravlev A (2001) *Crisis de Gobernabilidad en la Gestión del Agua: Desafíos que Enfrenta la Implementación de las Recomendaciones*

*Contenidas en el Capítulo 18 de Programa 21*. Naciones Unidas. Santiago, Chile. 83 pp.

González Vallejos F, Riquelme Garcés A, Contreras Luque P, Mazuela P (2013) Antecedentes generales para la sustentabilidad de producción hortícola en el valle de Azapa, Arica, Chile. *Idesia* 31(4): 119-123.

IPLA (1996) *Análisis Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile: Informe Final*. Departamento de Estudios y Planificación. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 640 pp.

JICA (1995) *The Study on the Development of Water Resources in Northern Chile*. Japan International Cooperation Agency / Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas de Chile. Tokio, Japón. 496 pp.

Lara Valle J (2004) Representación de las distribución de población mediante SIG: el uso de la técnica "Density Surface". En Conesa García C, Álvarez Rogel Y, Granell Pérez C (Eds.) *El Empleo de los SIG y la Teledetección en Planificación Territorial*. Murcia, España. pp. 455-470.

Saavedra A, Tapia L (2009) Relación de los efectos climáticos sobre las estrategias de producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en el Valle de Azapa, Provincia de Arica, entre los años 1995-2005. *Idesia* 27(2): 91-96.

Sahuquillo Herráiz A (2009) La importancia de las aguas subterráneas. *Rev. Real Acad. Cs. Exact. Fís. Nat. Esp.* 103: 97-144.

Salazar C (2003) *Situación de los Recursos Hídricos en Chile*. Centro del Tercer Mundo para Manejo de Agua. México. 102 pp.

Sandoval J (2003) *El Riego en Chile*. Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 4 pp.

Silverman BW (1986) *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman and Hall. Nueva York, EEUU. 176 pp.