



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

MODELACION DEL EFECTO DE LA RECARGA ARTIFICIAL SOBRE
LA OPERACIÓN DEL DREN LAS VEGAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

EUGENIO AARON TOBAR ESPINOZA

PROFESOR GUIA:
JAMES McPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISION:
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS
RICARDO OPAZO CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2009

Agradecimientos:

A Dios,
A James McPhee, cuya disposición y claridad fue de invaluable ayuda,
A Ricardo Opazo, por haber gestionado y guiado un tema relevante,
A mi familia y seres queridos, por su gran apoyo y empuje,
A mis compañeros de trabajo, por su aporte anímico e ingenieril,

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: EUGENIO TOBAR E.
FECHA: 10/12/2009
PROF. GUIA: Sr. JAMES McPHEE TORRES

“MODELACION DEL EFECTO DE LA RECARGA ARTIFICIAL SOBRE LA OPERACIÓN DEL DREN LAS VEGAS”

El objetivo general del presente trabajo de título es modelar y analizar el efecto que tiene la recarga artificial sobre el funcionamiento y la operación del dren Las Vegas. Se entiende por recarga artificial la acción de ejecutar obras que generen un transporte de agua desde la superficie hasta la napa subterránea, en condiciones en que sin intervención directa dicho transporte nunca hubiera ocurrido.

Se estudia el caso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Las Vegas, que tiene la particularidad de recoger agua cruda de fuentes superficiales y subterráneas a la vez. La captación superficial corresponde a una bocatoma ubicada cerca del fin de la segunda sección del río Aconcagua, mientras que la captación subterránea es un dren construido a 40 [m] bajo la superficie. El dren Las Vegas aprovecha el angostamiento del valle para establecerse como una barrera que intenta captar el mayor caudal posible. Para aumentar el caudal captado por el dren existen las llamadas lagunas de infiltración, que tienen por misión aprovechar el agua sobrante de la bocatoma e infiltrarla al acuífero.

La experiencia de recarga artificial en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Las Vegas es una de las pocas que está en funcionamiento pleno en Chile, pero aún así tiene mucho por donde mejorar su gestión. En el mundo la recarga artificial es utilizada ampliamente para administrar los recursos hídricos, desde zonas áridas como el medio oriente hasta zonas costeras y con ríos abundantes como Ámsterdam y París.

Se recopilaron los antecedentes pertinentes para poder construir un modelo hidrogeológico utilizando Visual MODFLOW, entre ellos, topografía del recinto, estudios hidrogeológicos y datos hidrológicos. Las fuentes principales de información fueron estudios de terreno realizados en el momento de construcción del dren y modelos hidrogeológicos de la cuenca del río Aconcagua encargados por la Dirección General de Aguas. El modelo resultante fue ajustado para que representara fielmente lo observado en terreno entre los meses de enero de 2008 y marzo de 2009.

El modelo ajustado fue utilizado para establecer la tasa de recarga para cada sector del recinto donde podrían emplazarse nuevas lagunas de infiltración. Posteriormente se calcula la superficie necesaria para construir dichas lagunas, teniendo en cuenta consideraciones de acceso y mantención. Además, se calcula la cantidad de lagunas necesarias para distintos escenarios de demanda al dren.

Asumiendo un valor deseable de caudal captado por el dren de 1.250 l/s se estima que se necesita inundar 17 [Há], equivalente aproximadamente a 50 lagunas pequeñas.

Se concluye que puntos interesantes de estudiar serían: la calidad del agua infiltrada y como afecta al acuífero, la precisión de los datos con los que se trabajó y el grado de influencia de ellos en el resultado, la factibilidad de realmente establecer un régimen de mantención serio y sus posibles implicancias económicas.

TABLA DE CONTENIDOS

Índice de figuras	v
Índice de tablas.....	vi
1. INTRODUCCION.....	7
1.1. Motivación.....	7
1.2. Planta de tratamiento de agua potable Las Vegas.....	8
1.3. Objetivos.....	9
1.4. Metodología.....	10
1.5. Resultados esperados.....	10
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS.....	11
2.1. Experiencias internacionales.....	11
2.2. Experiencias nacionales.....	12
2.3. Modelamiento de recarga artificial.....	13
3. ANTECEDENTES ZONA DE ESTUDIO.....	15
3.1. Ubicación.....	15
3.2. Topografía.....	16
3.3. Clima e Hidrología.....	17
3.4. Usos del agua.....	19
3.5. Geología e hidrogeología.....	19
3.6. Recarga artificial: situación actual en la zona de estudio.....	21
4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	22
4.1. Introducción a Visual MODFLOW.....	22
4.1.1. USGS MODFLOW.....	22
4.1.2. Visual MODFLOW.....	22
4.1.3. MODFLOW-SURFACT.....	23
4.2. Construcción de dominio físico del modelo.....	23
4.2.1. Límites y topografía.....	23
4.2.2. Discretización espacial y temporal del dominio.....	24
4.2.3. Definición de celdas inactivas (flujo nulo).....	25
4.3. Entrada de características del suelo.....	27
4.3.1. Conductividad hidráulica.....	27
4.3.2. Capacidad, retención y porosidad.....	28
4.3.3. Parámetros para fórmula de van Genuchten.....	29

4.4. Definición condiciones de borde	30
4.4.1. Infiltración desde río Aconcagua.....	31
4.4.2. Flujo subterráneo desde aguas arriba.....	32
4.4.3. Infiltración desde lagunas.....	33
4.4.4. Dren de captación	33
4.5. Calibración del modelo	34
5. OPERACIÓN	36
5.1. Ubicación de las obras de recarga artificial	36
5.2. Lineamientos para construcción y mantenimiento de lagunas de infiltración	38
5.3. Caudales	40
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	42
7. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS	47

Índice de figuras

Figura 1.- Ubicación de zona de estudio	15
Figura 2.- Curvas de nivel en zona de estudio	16
Figura 3.- Curva variación estacional y caudales medios mensuales – Aconcagua en Romeral	18
Figura 4.- Evapotranspiración potencial – Cuenca del Río Aconcagua	18
Figura 5.- Esquema de flujo – PTAP Las Vegas	21
Figura 6.- Límites dominio del modelo.	24
Figura 7.- Vista en planta del modelo.....	25
Figura 8.- Vista en corte del modelo a lo largo de la columna nº4.	26
Figura 9.- Vista 3D del modelo.....	26
Figura 10.- Conductividad hidráulica.....	27
Figura 11.- Estratos definidos y distribución de coeficientes detallados.	28
Figura 12.- Zonas de recarga definidas	37
Figura 13.- Ejemplo colmatación en una laguna de la PTAP Las Vegas	39
Figura 14.- Ejemplo dimensiones de lagunas y obras asociadas.	40

Índice de tablas

Tabla 1.- Coeficientes de capacidad y retención específica para cada estrato.	28
Tabla 2.- Porosidades total y efectiva para cada estrato	28
Tabla 3.- Parámetros de la zona no saturada (entre paréntesis la denominación usada por Visual MODFLOW).	30
Tabla 4.- Condiciones de borde a representar.	30
Tabla 5.- Parámetros- Condición de borde <i>Stream</i>	31
Tabla 6.- Período a utilizar en calibración	34
Tabla 7.- Resultados calibración.....	35
Tabla 8.- Resultados simulaciones - valores de tasa de recarga determinado.....	38

1. INTRODUCCION

1.1. Motivación

El agua dulce actualmente es uno de los recursos más importantes a nivel mundial, condición que sin duda se acentuará en un futuro cercano. Es en consideración de esto que en la actualidad existe un sin número iniciativas que buscan regular y en lo posible optimizar su uso. Por ejemplo, en Chile en el año 1981 se introdujo el sistema de derechos de agua con la intención de acercarse a dicho objetivo.

Los derechos de agua actualmente otorgados se pueden catalogar por el uso final del recurso. Las categorías principales son: actividad industrial, riego y producción de agua potable, sin que la autoridad establezca prioridad para entregar derechos a una actividad en perjuicio de otra. Este criterio de igualdad tiene especial relevancia en el rubro de producción de agua potable en el que las empresas deben contar con su materia prima con un alto grado de certeza, ya que la producción y distribución de agua potable a los hogares del país es un servicio clave en el desarrollo normal de las actividades diarias.

Considerando los puntos anteriores se plantea la necesidad de mejorar la gestión de los derechos de aprovechamiento del recurso de forma de disminuir las situaciones en que se tienen derechos ociosos y/o sencillamente desperdiciados.

Una de las mencionadas situaciones que se observa actualmente es que las empresas productoras de agua potable se ven en la obligación de adquirir derechos de agua suficientes para satisfacer la demanda de la población en todo momento, lo que tiene la consecuencia directa que las empresas adquieren derechos cuyo único propósito es contar con una mejor probabilidad de contar con agua disponible en época de sequía.

Ahora bien, dejando de lado el debate sobre la estructura del sistema de derechos de agua, lo que se propone es que si necesariamente se tendrán recursos “sobrantes”, lo más responsable es buscar alternativas para hacer uso eficiente de éstos. En el caso de la producción de agua potable se propone considerar la implementación de sistemas de recarga artificial a acuíferos para que el agua pueda ser aprovechada a través de captaciones de agua subterránea. Se habla de recarga artificial de acuíferos cuando se generan condiciones que alteran el ciclo natural de recarga, ya sea a través de riego u obras de acumulación de agua.

En Chile, especialmente en la zona centro del país, hay muchos acuíferos que se encuentran sobre-explotados, por lo que la asignación de nuevos derechos sobre ellos o simplemente la utilización de derechos ya constituidos ve amenazada su factibilidad.

Ante la existencia de las situaciones anteriormente expuestas se hace atractiva la alternativa de generar artificialmente las condiciones para contar con recursos subterráneos “frescos”, especialmente si se tienen captaciones subterráneas ya construidas.

El tipo de captación subterránea más comúnmente utilizado es el pozo de bombeo vertical, que consiste en una excavación profunda (tan profunda como lo requiera el usuario y lo permitan las condiciones de terreno), un revestimiento de dicha excavación y una bomba sumergida que eleva el agua hasta la superficie.

Existen además captaciones horizontales que consisten principalmente en tuberías enterradas bajo varios metros de terreno (aunque existen veces en que son verdaderos túneles) cuya función es captar el agua que fluye en sus cercanías y entregarla comúnmente a alguna estructura desde la cual se bombea el agua a la superficie o se conduce hasta otro lugar para su utilización. A estas captaciones comúnmente se les llama drenes o galerías de captación.

La principal diferencia entre las captaciones descritas es que la captación horizontal normalmente funciona de forma gravitacional, es decir, no hay ningún mecanismo que atraiga el agua hacia su interior. Es así que la cantidad de agua captada depende principalmente de la carga piezométrica sobre la captación.

En el caso de una captación gravitacional cobra importancia lo que se pueda realizar para aumentar el nivel de aguas del acuífero y por lo tanto estudiar las posibilidades de utilizar la recarga artificial para dicho propósito.

En esta memoria se plantea un modelo que permita estudiar el funcionamiento de la galería subterránea Las Vegas ante distintos escenarios de recarga artificial.

1.2. Planta de tratamiento de agua potable Las Vegas

La construcción y operación de las obras sanitarias de la región de Valparaíso actualmente es de responsabilidad de ESVAL S.A., empresa de capitales privados a la que el estado entrega en concesión dichas obras. Las responsabilidades de ESVAL S.A. para con los habitantes del territorio operacional que controla se pueden dividir en cuatro etapas: producción, distribución, recolección y finalmente, disposición final y tratamiento. Cada cinco años la empresa sanitaria, junto con la Superintendencia de Servicios Sanitarios, entran en un proceso tarifario del que se obtiene como resultado una tarifa asociada a cada una de las etapas ya mencionadas.

Es en la etapa de producción que se incluyen los sistemas de captación y tratamiento de agua potable, además de la conducción de este recurso hasta los centros de consumo respectivos.

El caso en estudio corresponde al sistema de producción Las Vegas, ubicado en la segunda sección del río Aconcagua, cerca de donde éste se junta con la ruta 5 Norte, a la altura del km 98 de dicha ruta.

El principal componente del sistema es la planta de tratamiento de agua potable Las Vegas, de tipo convencional y cuyos procesos incluyen: captación por bocatoma, paso por pre-decantadores, coagulación, floculación, sedimentación y filtración. Adicionalmente a la PTAP

Las Vegas, se tiene el aporte de la galería subterránea Las Vegas, que corresponde a una captación horizontal ubicada perpendicularmente al eje del río Aconcagua en la zona.

El agua filtrada por la PTAP Las Vegas y el agua captada por la galería subterránea son conducidas conjuntamente hasta el recinto Ocoa de ESVAL, donde se le aplican los procesos de desinfección y fluoración. Posterior a dichos procesos, el agua es conducida a través del acueducto Las Vegas a lo largo de 80 [km] aproximadamente, llegando finalmente a la red de distribución del Gran Valparaíso.

La producción total del sistema Las Vegas alcanza el valor de 2.500 [l/s] en promedio durante los últimos tres años, siendo el aporte de las plantas superficiales cercano a las 1.500 [l/s]. Este valor no corresponde al caudal de diseño de dichas plantas, sino a un caudal máximo de operación, lo que se traduce en elevados costos de operación debido a un mayor consumo de insumos químicos y mayor frecuencia de limpieza de la planta.

Considerando el punto anterior es que se ha venido estudiando la forma de invertir los papeles y producir gran parte del agua potable a través de la galería subterránea de forma de alivianar el trabajo de las plantas superficiales, considerándose incluso la posibilidad de trabajar con sólo una planta si es que se llega a resultados que lo permitan.

Como parte de los esfuerzos actuales se encuentran las llamadas “lagunas de infiltración”, obras de retención de agua que permiten que el flujo se detenga lo suficiente para que una parte se infiltre y posteriormente sea captado por la galería.

1.3. Objetivos

Objetivos Generales:

- Estudiar y generar un modelo de cómo afecta la recarga superficial artificial al caudal captado por la galería subterránea Las Vegas.

Objetivos Específicos:

- Optimizar el diseño de las futuras obras destinadas a producir una recarga de la napa, al contar con datos más detallados del terreno.
- Sentar las bases para generar un sistema de pronóstico del caudal captado por la galería, ya que uno de los factores – la recarga superficial – ya estaría bien estudiada.
- Introducir la posibilidad de que la mayoría del proceso productivo sea absorbido por el dren en estudio, es decir, al contar con predicciones más confiables de la producción del dren se puede llegar a prescindir del tratamiento convencional.

1.4. Metodología

Para llevar a cabo el trabajo propuesto en los puntos anteriores se sigue el procedimiento delineado a continuación:

- Recolectar datos históricos de interés (estratigrafía del suelo, caudales del río, funcionamiento de lagunas de recarga) de la zona de estudio, para lo cual se recurre a los datos de diversas fuentes, entre ellas la empresa que opera el dren, datos públicos de la DGA, etc.
- Generar un modelo hidrogeológico integral de la zona de estudio – a través del software especializado Visual MODFLOW – de forma de poder simular diversas situaciones de funcionamiento del dren. Dichas simulaciones son complementadas con datos reales y actuales medidos en terreno para darle mayor validez al modelo.
- De acuerdo a lo descrito en el modelo se recomendarán las mejoras a las obras existentes, así como también las especificaciones de las obras futuras. Este modelo deberá ser capaz de relacionar directamente las condiciones de funcionamiento de las obras (nivel del agua en una laguna, tiempo transcurrido desde la última limpieza de la laguna) con el caudal que captará el dren.
- Todo esto está íntimamente ligado a un trabajo en terreno que valide tanto los datos como los resultados del proyecto. Las mediciones que pueden ser necesarias realizar incluyen: ensayos de infiltración, calicatas, cierre y/o apertura de lagunas de recarga, sondajes y análisis de calidad de agua (importa especialmente la turbiedad).

1.5. Resultados esperados

Los resultados que se esperan haber obtenido al término de la realización de este trabajo de título se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Identificar plenamente la relación entre las obras de recarga artificial y el caudal captado por el dren.
- Aprovechar plenamente las capacidades de producción de agua potable del dren y posibilitar una gestión integral del proceso productivo de la PTAP Las Vegas.
- Contar con un modelo validado de la zona de estudio que pueda ser utilizado para realizar futuros estudios relacionados con el dren.
- Establecer base para implementar un sistema computacional de supervisión y/o predicción del funcionamiento de las lagunas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS

2.1. Experiencias internacionales

La recarga artificial es utilizada en el mundo con el propósito de administrar los recursos hídricos subterráneos y superficiales de una manera sustentable, segura y eficiente. Su uso es indistinto en zonas áridas y húmedas, sirviendo diferentes prioridades en cada una.

La distribución porcentual del volumen de agua recargado artificialmente, sin distinguir según el destino final de su utilización, se estructura según la siguiente asignación: Estados Unidos de América (85%); Unión Europea (13%); otros países del mundo (2%) (Murillo y co-autores 2000). También cabe mencionar que en Estados Unidos se tienen registros de las primeras experiencias de recarga artificial cerca del año 1896, mientras que en Suecia en el año 1897, para luego extenderse la práctica por el resto de Europa.

En zonas áridas la recarga artificial permite utilizar acuíferos como embalses subterráneos, permitiendo almacenar agua proveniente de las escasas precipitaciones, excesos de riego y aguas servidas previamente tratadas. En zonas húmedas se utiliza para enfrentar problemas como la sobre-explotación de acuíferos, la intrusión salina, o simplemente aprovechar la capacidad reguladora de los acuíferos para ejercer una regulación entre temporadas de bajo y alto consumo.

Ejemplos de recarga artificial en el mundo incluyen:

- La recarga sin supervisión del agua sobrante del riego en el delta oriental del río Nilo en Egipto durante la expansión agrícola en dicha área tuvo el efecto de elevar los niveles del acuífero. Actualmente se estudia ejecutar una recarga controlada en una nueva área de expansión (Attia & Moustafa 1998).
- Infiltración de aguas servidas y su posterior recuperación en zonas de Kuwait (Viswanathan & Al-Senafy 1998), Australia del Sur (Bosher & Simms 1998).
- El Proyecto de Almacenamiento Subterráneo del Arrecife de Granito (GRUSP por sus siglas en inglés), que consiste en un sistema de cuatro lagunas de infiltración que recibe el agua no utilizada de la importada por las municipalidades del área de Phoenix desde el río Colorado a través de un acueducto de 550 [km], obra que forma parte del Central Arizona Project (Lluria 1998).
- Infiltración de agua cruda proveniente de cuerpos superficiales y su posterior aprovechamiento como agua potable en ciudades como: Paris (Haeffner, Detay & Bersillon 1998), Amsterdam (Horst 1998) y Viena (Dreher & Gunatilaka 1998).
- Diversos estudios de factibilidad y experiencias piloto en numerosos lugares del mundo, tales como la provincia de Alicante, España (Murillo y co-autores 2000), Barcelona (Pérez-Paricio & Carrera), Municipio de Morroa, Colombia (CARSUCRE 2009).

Entre los problemas que presenta la recarga artificial, los principales son la colmatación de las obras de infiltración debido a sedimentos y la posible contaminación del acuífero debido a pobre calidad del agua infiltrada.

La colmatación ha sido estudiada extensivamente pero hasta el momento no se ha encontrado una solución que se aplique a todos los sitios en que se aplica la recarga artificial, ya que la rapidez y gravedad depende de factores tan variables como: la altura piezométrica de la laguna de infiltración (Bouwer & Rice, 1989), la calidad del agua afluente al sitio de recarga (Pavelic y co-autores 1998) y la presencia de ciertos tipos de bacterias (Albrechtsen & co-autores 1998). Con respecto a las bacterias y su efecto sobre la colmatación, cabe mencionar que en el caso de la zona de Phoenix, Arizona, mencionado anteriormente, se observa que en el verano crece un tipo de alga filamentosa que aparentemente retiene el material suspendido impidiendo que éste llegue al fondo, lo que ha permitido que el sistema de lagunas funcione sin la necesidad de ser limpiado.

Por otro lado, instituciones como la Organización Mundial de la Salud han expresado preocupación por posibles efectos negativos a la salud de la población que puedan originarse en la recarga de acuíferos, específicamente en los casos que involucran aguas servidas. Entre los comentarios emitidos por dicho organismo se encuentran recomendaciones sobre priorizar investigación acerca de los riesgos microbiológicos, tiempos de residencia, atenuación de riesgos por acción del suelo y/o del acuífero, distancias de extracción y alternativas de desinfección (WHO 2003).

En resumen, la experiencia internacional demuestra ser variada y, en algunos casos, de larga data, por lo que al menos se sabe que existen las condiciones para buscar conocimientos que se puedan aplicar localmente.

2.2. Experiencias nacionales

Si se deja de lado el caso en estudio en el presente informe (sistema de producción de agua potable Las Vegas), las experiencias de recarga artificial en Chile son escasas.

Si se considera que Chile continental posee una geografía que permite poca retención del agua fluvial, especialmente en lluvias de alta intensidad, es natural pensar en la necesidad de contar con formas de retener el agua para poder utilizarla en tiempos de menor disponibilidad y mayor demanda, necesidad que hasta cierto punto ha sido satisfecha con la construcción de embalses para riego y/o generación eléctrica. Ahora bien, es bien sabido que la posibilidad de construir nuevos embalses es cada vez más lejana por su elevado costo económico y baja popularidad ambiental, por lo que estudiar la recarga artificial para utilizar los acuíferos como sistemas de regulación aparece como un paso natural.

Desde el punto de vista regulatorio existen condiciones que se deben cumplir previamente a llevar a cabo actividades de recarga artificial, las cuales están definidas en el Decreto Supremo N°46 del 2002, "Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas". Esta norma establece que dependiendo de la vulnerabilidad del acuífero, se

debe cumplir un estándar tal que la calidad natural del acuífero no se vea comprometida, siendo entonces la vulnerabilidad uno de los puntos clave a estudiar en el proceso de proyectar un sistema de recarga artificial. La vulnerabilidad del acuífero se debe determinar en base a la profundidad del punto de descarga, las propiedades del suelo (zonas saturada y no saturada), las características intrínsecas del acuífero, los niveles freáticos más desfavorables, el tipo de acuífero y las características de la recarga. Ahora bien, aunque dicha norma fue concebida para regular la descarga de aguas servidas y/o residuos industriales líquidos, establece parámetros mínimos de calidad que, de ser superados por agua superficial a ser infiltrada, obligan a someterse a lo establecido por la norma.

En el año 1999 se presentan estudios experimentales sobre la posibilidad de utilizar un sistema SAT (Soil Aquifer Treatment o Tratamiento Suelo Acuífero) para recuperar las aguas servidas de las ciudades de Arica y Copiapó (Dibarrart 1999; Honeyman 1999). En el caso de Copiapó, ha sido ampliado con nuevos experimentos orientados a definir las bases de diseño de un sistema de este tipo (Vallejos 2001). En general, de dichos estudios se concluye existe potencial de buena remoción de DQO, COT y DBO₅, no así para nitratos.

En la Región de Valparaíso, en los valles de La Ligua y Petorca, se determinó a través de simulaciones computacionales que se pueden obtener eficiencias de infiltración/recuperación cercanas al 40% y un aumento en la capacidad de explotación de un 50% (Schuster & Sepulveda 1999).

En la Región Metropolitana, se tiene la experiencia desarrollada por Aguas Cordillera en la zona del Mapocho Alto, específicamente en las cercanías de la PTAP Lo Gallo. En este caso, se llegó a la conclusión que al infiltrar agua proveniente de derechos eventuales, sería posible aumentar la producción de los sondajes de la PTAP Lo Gallo en un 10% aproximadamente (Wilmans 2001).

Si bien, los acercamientos a nivel de estudio existen, hay muy pocas instancias donde se haya llevado a cabo la puesta en servicio de un sistema de recarga artificial, y mucho menos uno con el nivel de monitoreo y operación observado en otros países.

2.3. Modelamiento de recarga artificial

Los modelos de sistemas de recarga artificial se pueden clasificar según su propósito en dos categorías principales:

- Modelos de laboratorio y/o plantas piloto que permiten evaluar la factibilidad de ejecutar una recarga artificial, normalmente acompañado de un modelo computacional en dos dimensiones para modelar los diferentes estratos del suelo en estudio. Un ejemplo de éste tipo de modelo es el construido por Vallejos para el Valle de Copiapó.

- Modelos de simulación integral, los que tiene por objetivo evaluar el funcionamiento de un sistema ya construido o simular el de uno pronto a entrar en operación. En general, son modelos en tres dimensiones que incorporan gran cantidad de información hidrológica e hidrogeológica. Además, este tipo de modelo puede incluir simulación de transporte de partículas.

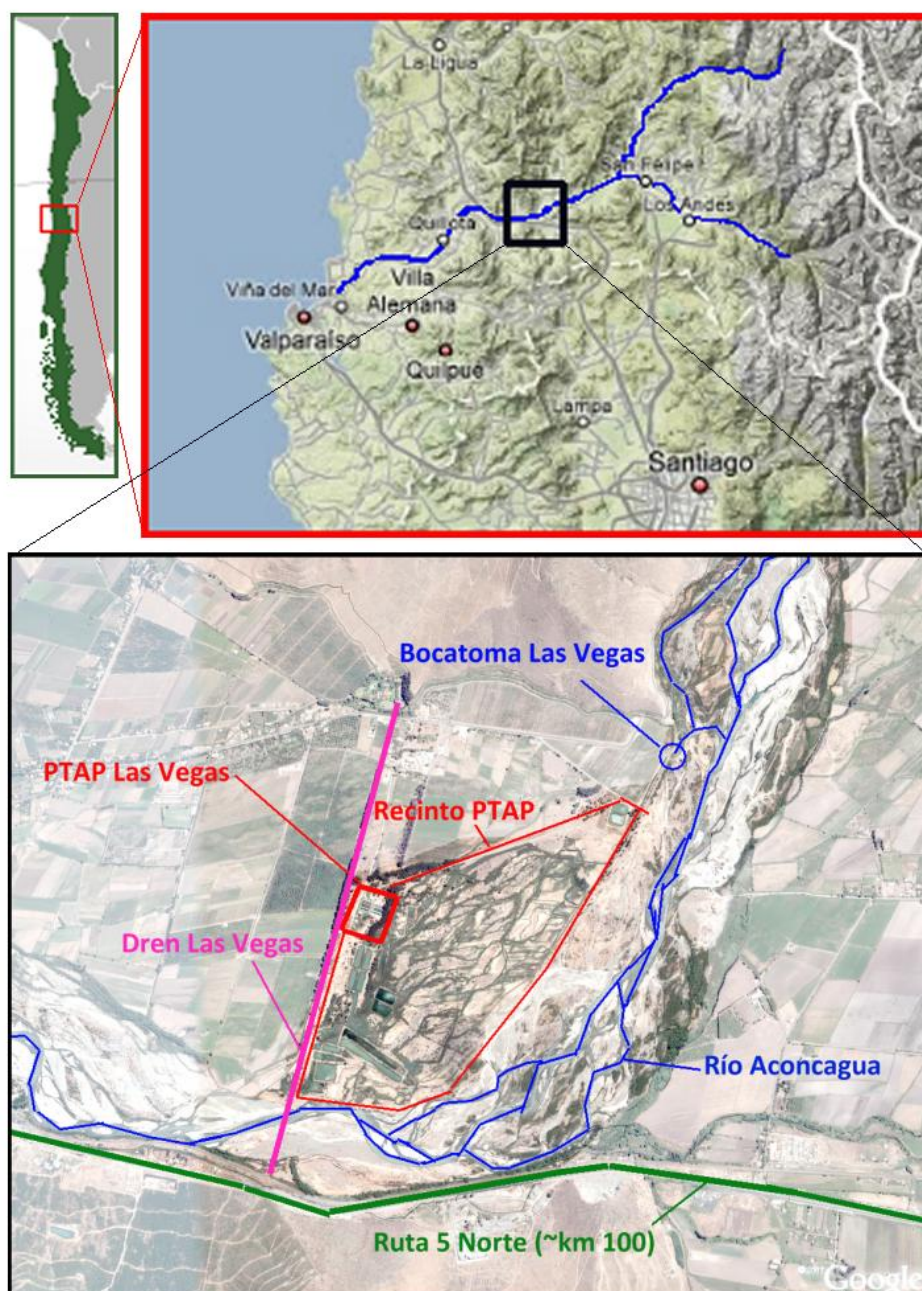
Para los modelos mencionados, se utilizan software especializados tales como HYDRUSS2D y Visual MODFLOW, aunque también existen casos en que se utilizan herramientas menos comunes, dependiendo de la magnitud del proyecto y de la preferencia personal, como ejemplo se tiene el caso de un modelo simple desarrollado por una firma holandesa para transporte de contaminantes durante la recarga artificial (Stuyfzand, 1998).

3. ANTECEDENTES ZONA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación

La zona de estudio está ubicada en la V Región de Valparaíso, en el valle del Río Aconcagua, específicamente en el sector de la Puntilla de Romeral ($32^{\circ}50' S$, $71^{\circ}01' O$). En la figura 1 se muestra la zona de estudio misma, sus principales componentes, además de elementos geográficos de referencia.

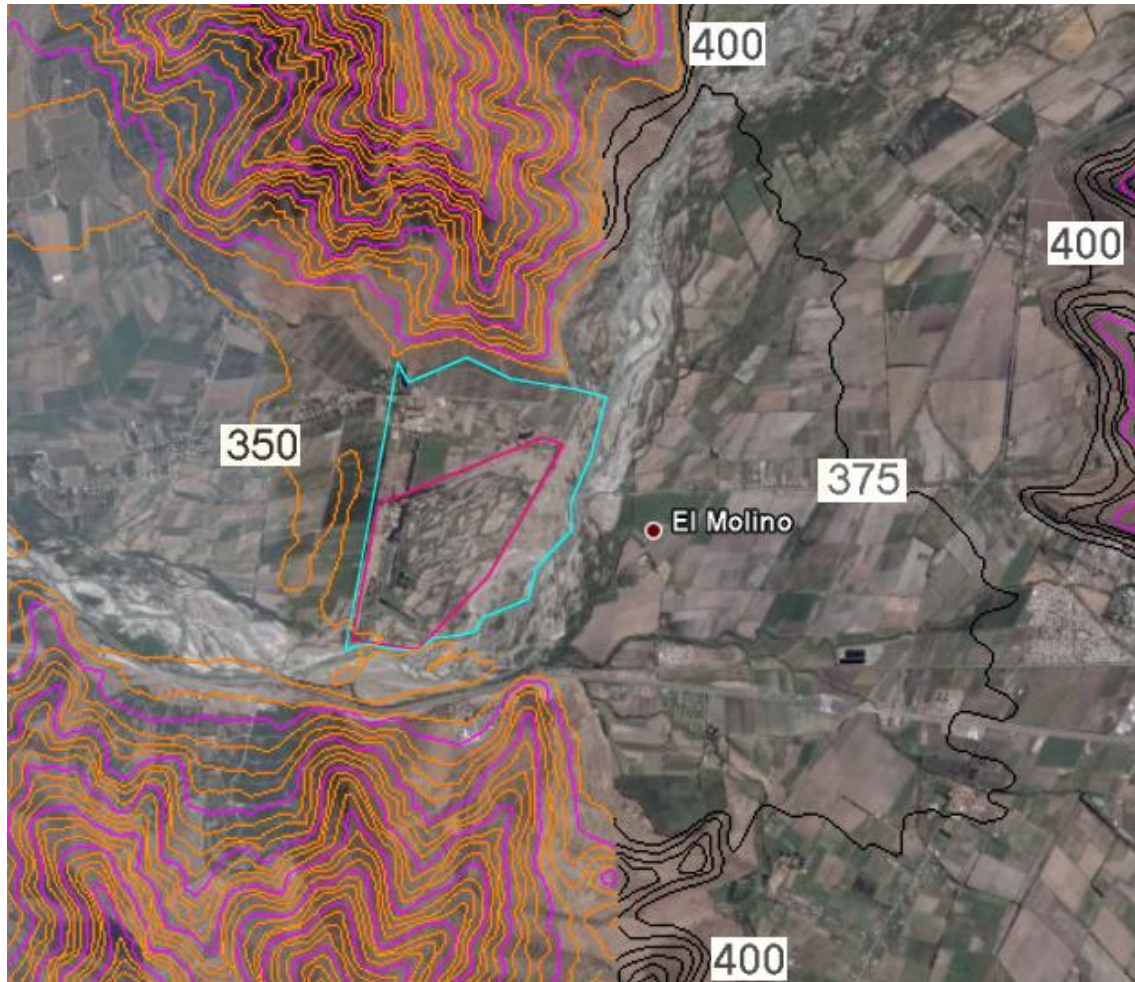
Figura 1.- Ubicación de zona de estudio



3.2. Topografía

Para obtener la topografía de la zona se recurre a cartas IGM (Instituto Geográfico Militar), archivos DEM (Modelo de Elevación Digital) del USGS (United States Geological Survey), y la topografía de detalle realizada para el proyecto original de construcción de la galería Las Vegas. En la figura 2 se muestra la zona de estudio y las curvas de nivel correspondientes según las cartas IGM (curvas de nivel cada 25 [m]).

Figura 2.- Curvas de nivel en zona de estudio



En la figura anterior se puede apreciar que la variación de cota en la zona de estudio es inferior a la precisión otorgada por las cartas IGM, por lo que en adelante se utiliza preferentemente la topografía realizada para el proyecto original, la que posee curvas de nivel cada 5 metros.

El plano del proyecto original de construcción del dren se escanea y las curvas de nivel presentes en él son traspasadas a formato digital. Dicha información se incluye en el plano “Zona de estudio – Planta general y Detalles”, que se encuentra en los anexos del presente informe.

3.3. Clima e Hidrología

El Río Aconcagua se encuentra dividido administrativamente en cuatro secciones principales y la sección de río Putaendo, la que es operada separadamente. Las secciones se enumeran siguiendo el sentido del flujo del río, siendo la primera la que corresponde a la parte cordillerana del río y la cuarta a la desembocadura. La zona abarcada en el presente estudio se encuentra ubicada cerca del fin de la segunda sección.

La segunda sección del río Aconcagua comprende desde el puente carretero del Rey, ubicado aproximadamente 25 [km] aguas arriba de la PTAP Las Vegas, hasta aproximadamente 4 [km] aguas debajo de ésta, cerca de donde se ubica la estación fluviométrica Aconcagua en Romeral. Esta estación se encuentra aguas abajo de la junta del río con los esteros Catemu y Las Vegas, a una cota de 310 [m.s.n.m]. (32°50' S, 71°04' O).

En la cuenca del Aconcagua predomina un tipo de clima templado mediterráneo que se caracteriza por una estación seca prolongada y un invierno pronunciado. La amplitud térmica es bastante elevada, por ejemplo, en la ciudad de Los Andes se registra una temperatura media anual de 15,2 [°C], pero en invierno se alcanzan temperaturas extremas cercanas a 0 [°C] y en verano las máximas superan los 27 [°C] durante el día. Cabe mencionar que la temperatura media anual en el resto de la cuenca es similar, siendo de 14,5 [°C] en el sector costero y de 14,1 [°C] en el sector cordillerano.

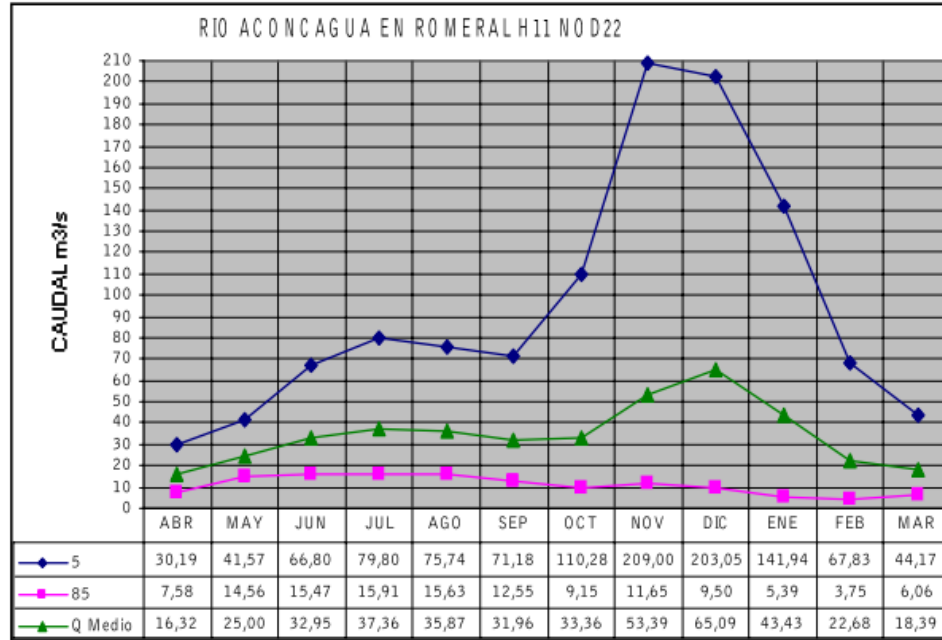
La precipitación media anual registrada en el sector costero de la cuenca alcanza un valor aproximado de 395 [mm/año], mientras que, en el sector centro de la cuenca (por efectos del relieve), se presenta un ambiente de mayor sequedad y precipitaciones menores, del orden de 261 [mm/año]. En los sectores de la cuenca más elevados, las precipitaciones (registradas por la estación Vilcuya) alcanzan valores medios de 467 [mm/año] (CADE-IDEPE, 2004).

En años húmedos los mayores caudales ocurren entre noviembre y enero, producto de deshielos, mientras que en el resto del año se observa un comportamiento bastante uniforme en los caudales.

En años secos los caudales permanecen bastante parejos a lo largo del año, con la excepción de leves aumentos entre junio y agosto, producto de lluvias invernales, y entre noviembre y diciembre, debido a deshielos.

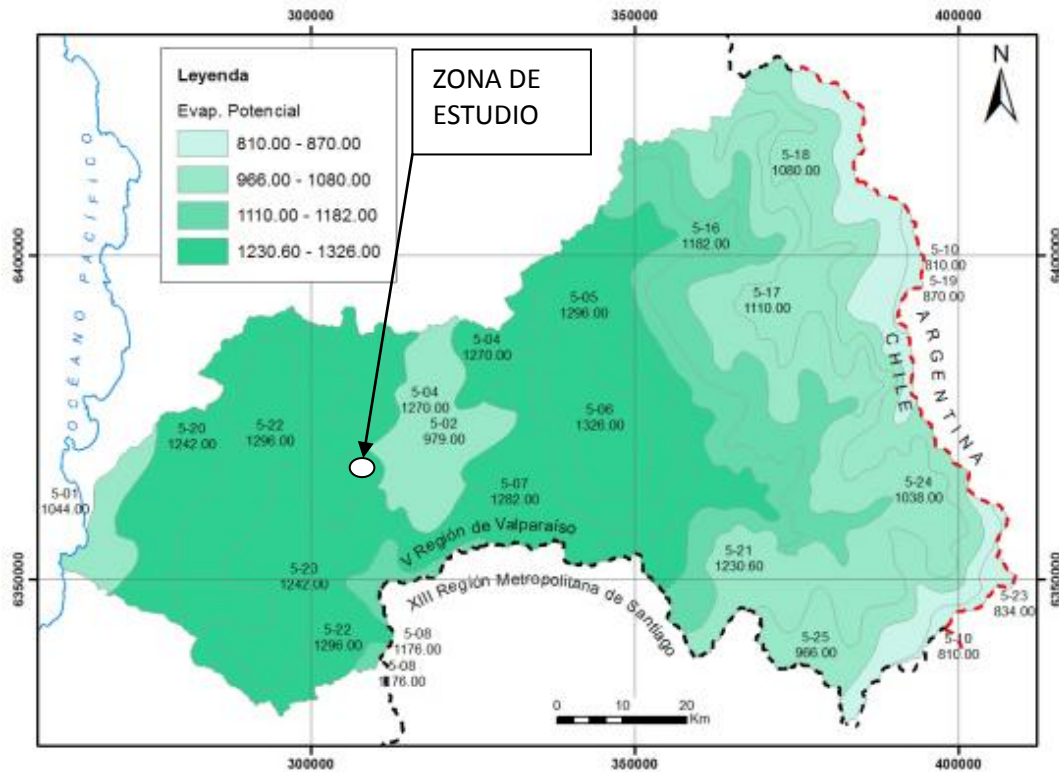
En la figura 3 se presenta la curva de variación estacional asociada a la estación Aconcagua en Romeral, con respecto a la cual cabe mencionar que al presentar varios años de información incompleta fue completada simulando un escenario histórico de explotación del río (Departamento de Administración de Recursos Hídricos, 2004). La misma figura también permite apreciar el régimen nivo-pluvial del río en el sector donde se ubica dicha estación.

Figura 3.- Curva variación estacional y caudales medios mensuales – Aconcagua en Romeral



En la figura 4 se muestra la distribución de la evapotranspiración potencial en toda la cuenca del Aconcagua (Comisión Nacional de Riego, 2007)

Figura 4.- Evapotranspiración potencial – Cuenca del Río Aconcagua



3.4. Usos del agua

Los usos del agua principales de la cuenca del río Aconcagua son: riego, actividad industrial, abastecimiento de agua potable, actividad minera y generación de energía eléctrica. A continuación se revisa cada uso y su situación particular en la cuenca.

- Riego: se desarrolla en casi toda la cuenca, aunque en la cuarta sección se riegan 1.500 [Há], muy inferior a las más de 50.000 [Há] que se riegan en las primeras tres secciones (Comisión Nacional de Riego, 2007). La infraestructura dedicada al riego presente en la cuenca consiste en 1.230 canales, con 470 km de longitud en total; 51 embalses menores y 3 embalses mayores, la que satisface una demanda que, en el año 1997 era de 1.023 millones de m³/año de demanda bruta (429 millones de m³/año demanda neta) (CADE-IDEPE, 2004).
- Actividad Industrial: agrupando toda la actividad industrial de la cuenca se tiene una demanda bruta de 80 millones de m³/año (54 millones de m³/año demanda neta) para el año 1997. Se espera que para el año 2020 dicha demanda se duplique (CADE-IDEPE, 2004).
- Abastecimiento de agua potable: en la cuenca opera la empresa sanitaria ESVAL S.A., que abastece a gran parte de la población de la región. En conjunto, las bocatomas de la empresa suman una extracción (uso tipo consuntivo) de poco más de 3 m³/s, equivalente a 98 millones de m³/año (CADE-IDEPE, 2004).
- Actividad minera: se presenta en la zona cordillerana, siendo las principales empresas CODELCO (División Andina), Andacollo y El Soldado. El consumo de este sector se estima cercano a los 40 millones de m³/año (CADE-IDEPE, 2004).
- Generación de energía eléctrica: presente principalmente en la primera sección, es decir, el sector cordillerano de la cuenca. La diferencia de este uso del agua con los usos anteriores, es que corresponde a un uso de tipo no consuntivo, es decir, luego de ser utilizada, el agua es devuelta al río con mínimo impacto sobre su calidad. Los caudales de diseño de las centrales alcanzan en conjunto cerca de 40 m³/s, equivalente a 1.261 millones m³/año.

3.5. Geología e hidrogeología

Sobre la geología de la cuenca del Río Aconcagua se sabe que cerca de la localidad de San Felipe existe influencia de rocas ácidas, mientras que en los sectores próximos a la desembocadura existe influencia mixta de rocas sulfuradas y de caliza (CADE-IDEPE, 2004).

Para la hidrogeología, por un lado, se analizan los modelos hidrogeológicos ya construidos para la cuenca, siendo el más importante el llamado "Evaluación de los recursos subterráneos de la cuenca del río Aconcagua", publicado en julio de 2001.

En los informes mencionados, para la zona de la PTAP Las Vegas se describe un acuífero relativamente uniforme, con dos unidades hidrogeológicas bien definidas. La primera, la llamada “Unidad B”, corresponde a un conjunto de sedimentos de granulometría gruesa a media, de ripios gravillentos, de una matriz arenosa, y que en algunos sectores presenta contaminación de limos arcillosos. La segunda, la “Unidad D” corresponde a un conjunto de sedimentos de fina granulometría del tipo arenas limosas con una abundante matriz de arcilla que representa más o menos un 50% del volumen total de los depósitos.

La unidad B es la de mayor importancia hidrogeológica del valle, ya que tiene características de un buen acuífero (alta conductividad, buena recarga) y además por su gran extensión (está presente en casi toda la cuenca).

Como fue mencionado, en el sector de la PTAP Las Vegas se presentan las unidades B y D, con la D subyaciendo a la B. En este sector el ancho de la unidad B se estima en mínimo 50 m, con un nivel estático cercano a los 5 m de profundidad. Hacia los flancos del valle se experimentan leves contaminaciones de finos debido al aporte de vertientes (DARH, 2001).

Como antecedente de la hidrogeología más local del recinto en estudio se cuenta con informes de terreno realizados en el momento de construcción de la galería, es decir, en la segunda mitad de la década de 1940. Por la naturaleza lenta de los cambios en la configuración física del suelo se considera que los resultados de los estudios mencionados siguen siendo válidos en la actualidad, o por lo menos entregan una aproximación de buena calidad.

Entre los estudios realizados se cuentan:

- Pruebas de velocidad en cada pozo/sondaje.
- Análisis granulométrico de muestras del suelo.
- Pruebas de agotamiento en los sondajes.

Los principales resultados de estos estudios son:

- Se diferencia la sección del terreno a lo largo del trazado de la galería en dos zonas: zona del río y zona del valle, correspondiendo la zona del río principalmente a la franja por donde fluye éste y la zona del valle al resto de la sección.
- Se cuantifica el contenido de arcilla en los perfiles de suelo de los sondajes, lo que permite considerar estratos tomando en cuenta principalmente dicha característica.
- Se establece la velocidad del flujo subterráneo, lo que permite el cálculo de la conductividad hidráulica

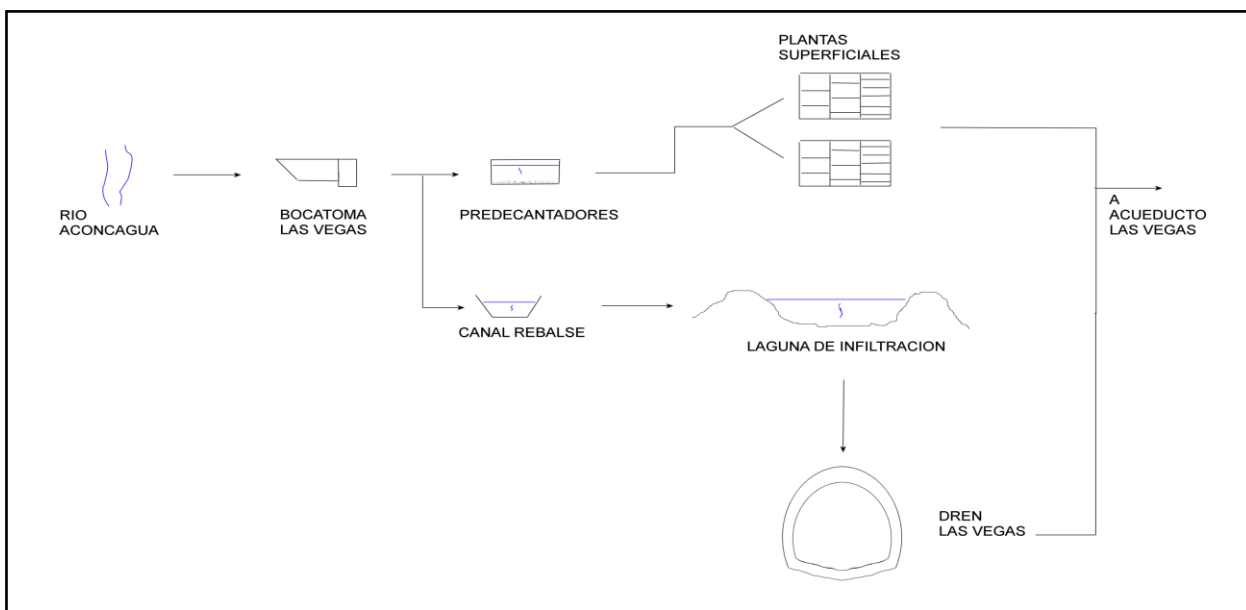
El informe emitido en base a estos estudio se adjunta al presente informe como el Apéndice B: “Estudio en terreno – Proyecto Galería Subterránea Las Vegas”.

3.6. Recarga artificial: situación actual en la zona de estudio

En la actualidad, en el recinto de la PTAP Las Vegas existen obras destinadas a generar una recarga artificial hacia el acuífero. Dichas estructuras se conocen como lagunas de infiltración. Entre las características principales de estas lagunas se pueden mencionar:

- Existen dos tipos: unas fueron excavadas en el terreno mientras que otras fueron construidas realizando un dragado en el terreno y acumulando ese material para formar un terraplén que contuviese el agua.
- Las datas de construcción de las lagunas varían entre 15 años y 18 meses aproximadamente.
- Las lagunas reciben agua desde el rebalse que conduce el caudal sobrante que no es utilizado por las plantas superficiales, es decir, las lagunas reciben agua que proviene directamente de la bocatoma en el río Aconcagua. El esquema del flujo del agua en el sistema productivo Las Vegas se puede observar en la figura 5.

Figura 5.- Esquema de flujo – PTAP Las Vegas



- En general se evidencia un grado de mantención deficiente, lo que se traduce a que la utilidad de las lagunas más antiguas sea prácticamente nula debido a la acumulación de material fino en su fondo.
- La construcción de las lagunas ha sido llevada a cabo basándose principalmente en datos empíricos, dejándose de lado un estudio acabado sobre la ubicación y características físicas óptimas de ellas.
- Actualmente las lagunas en funcionamiento aportan alrededor del 15% del caudal total captado por la galería subterránea Las Vegas.

En el Apéndice A, se presenta un plano que incluye un catastro de las lagunas actualmente en existencia en el recinto de la PTAP Las Vegas, incluyéndose características relevantes como su ubicación, dimensiones y fecha de construcción.

4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

En este capítulo se presenta la construcción del modelo de flujo subterráneo, proceso que es desarrollado utilizando el programa Visual MODFLOW, el que permite simular el comportamiento del flujo previa definición de datos relevantes como topografía, características hidrogeológicas y condiciones de borde del sistema.

4.1. Introducción a Visual MODFLOW

El programa Visual MODFLOW implementa una interfaz gráfica para trabajar con USGS MODFLOW, además de agregar otras funcionalidades. A continuación se trata esto más detalladamente.

4.1.1. USGS MODFLOW

Es un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas desarrollado por el U.S. Geological Survey (USGS), entidad gubernamental estadounidense dedicada al estudio y monitoreo de los recursos naturales de dicho país.

La característica básica de este modelo es que está basado en un esquema de diferencias finitas para resolver la ecuación de flujo subterráneo, a diferencia de otros modelos como FEFLOW, el que resuelve dicha ecuación con un esquema de elementos finitos.

La otra característica relevante para el presente trabajo es que su funcionamiento asume que se trata de un medio saturado, de forma que se cumplan los supuestos de la ecuación de flujo subterráneo, siendo necesario complementar el modelo con herramientas para resolver problemas con una zona de flujo en terreno no saturado.

4.1.2. Visual MODFLOW

Como ya fue mencionado, MODFLOW es un modelo computacional desarrollado por el USGS, lo que permite que sea una herramienta de dominio público pudiendo ser usada sin restricción alguna. Ahora bien, a pesar de dicha ventaja, su uso no está exento de barreras apreciables, en este caso, para usar el programa se necesita manejar los datos en archivos de texto con formatos predefinidos, además de una interfaz de usuario poco amigable.

Es con programas como Visual MODFLOW, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Software, que se explota el potencial del modelo a través de una interfaz visual e intuitiva que permite al usuario, entre otras cosas, modificar datos, graficar resultados y desplegar vistas en tres dimensiones del modelo.

Además de implementar una forma más amigable y avanzada de utilizar el modelo MODFLOW, las capacidades del software son extendidas por complementos desarrollados por Waterloo Hydrogeologic Software. Los mencionados complementos vienen en la forma de “paquetes de software” adicionales, entre ellos: MODPATH, MT3D, Zone Budget y MODFLOW-SURFACT, los que, respectivamente permiten simular el desplazamiento de partículas, modelar transporte de solutos, calcular balances hídricos en zonas especificadas por el usuario y modelar flujo en zonas no saturadas.

4.1.3. MODFLOW-SURFACT

Es un modelo numérico específicamente diseñado para problemas de flujo subterráneo en la zona no saturada del suelo. Alternativamente, también es utilizado en modelación de flujo de vapor de agua a través del suelo, con posibles aplicaciones en estudios de remediación.

Para simular el flujo de agua en la zona no saturada del suelo, se pueden usar tres modelos distintos:

- Pseudo-soil function: se utiliza una fórmula que utiliza las características del suelo (como la porosidad y el coeficiente de almacenamiento) para corregir la permeabilidad del suelo en la zona no saturada.
- Modelo de van Genuchten: se utiliza la ecuación de van Genuchten para calcular la retención de humedad del suelo y además para determinar las características de permeabilidad de la zona no saturada
- Modelo de Brooks-Corey: se utiliza la ecuación de van Genuchten para calcular la retención de humedad del suelo y la fórmula de Brooks-Corey para determinar las características de permeabilidad de la zona no saturada.

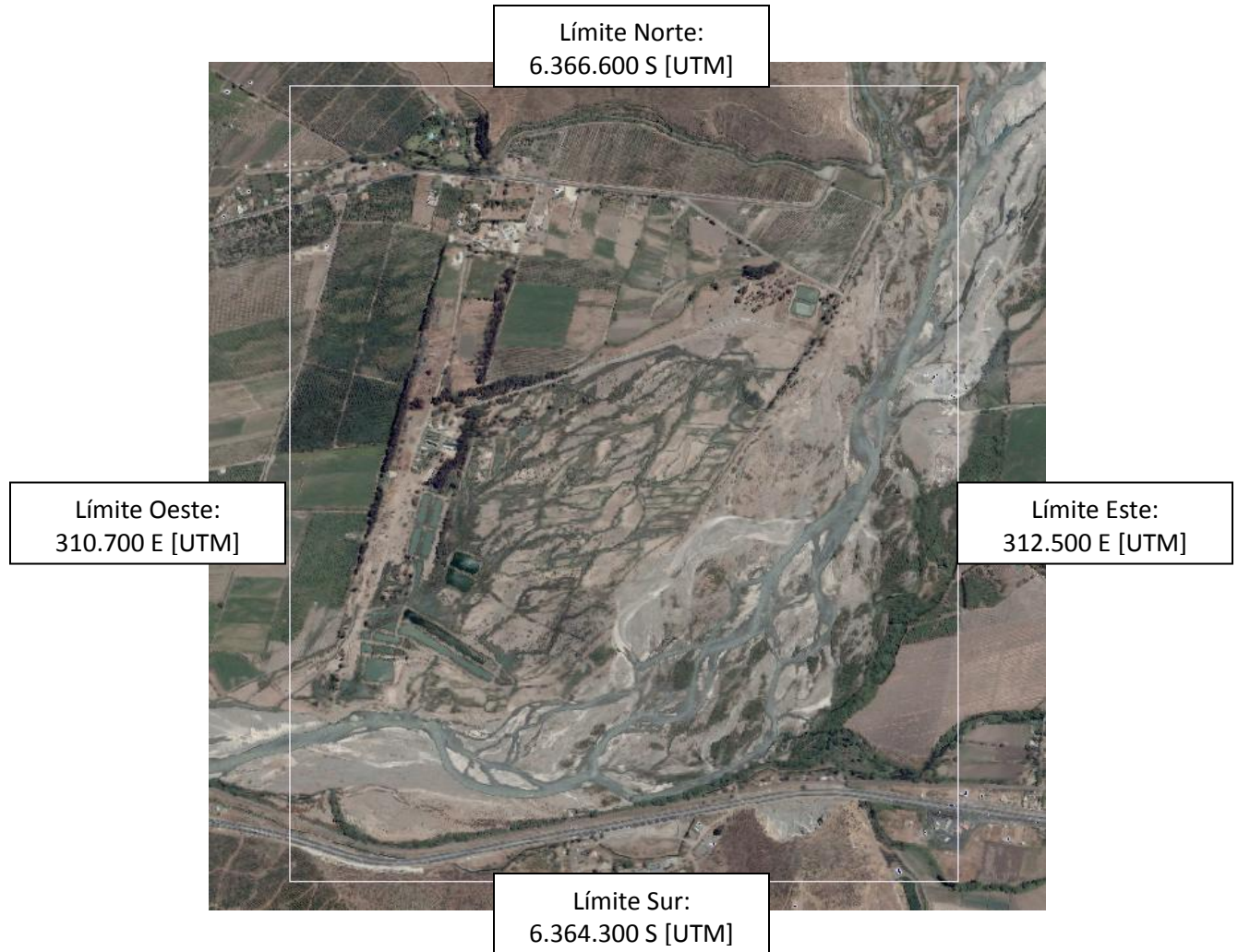
4.2. Construcción de dominio físico del modelo

4.2.1. Límites y topografía

La primera restricción que se impone al momento de definir los límites físicos del modelo es que ellos deben permitir que las condiciones de borde relevantes sean representadas cabalmente en el dominio definido. Las condiciones de borde a considerar son: el río Aconcagua, el dren Las Vegas y las formaciones montañosas al sur y al norte. En el punto 4.4. se discuten más en detalle las condiciones de borde.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecen los límites geográficos tal como son presentados a continuación en la figura 6.

Figura 6.- Límites dominio del modelo.



Por otro lado se cuenta con la topografía del área señalada, la que se importa al modelo desde un archivo DXF Autocad a través de una herramienta de conversión incluida con el programa Visual MODFLOW. Esta herramienta recoge las curvas de nivel desde dicho archivo y asigna la elevación al modelo interpolando en base a ellas.

4.2.2. Discretización espacial y temporal del dominio

Una vez definidos los límites del modelo se adopta una discretización espacial tal que cada elemento mide 50 metros por 50 metros, vistos en planta. Dichas dimensiones permiten trabajar con una unidad de área igual a un cuarto de hectárea (2500 m^2), y, siendo la hectárea la unidad de superficie en la que se expresa la tasa de recarga en el presente estudio, se estima que se obtiene una buena precisión.

Posteriormente se definen cinco capas de terreno que abarcan desde la cota de superficie hasta el lecho rocoso, siendo la intermedia más estrecha porque en ella está ubicado el dren, consiguiéndose así mantener las proporciones con respecto a las dimensiones de éste.

Esta discretización genera 36 columnas, 46 filas y 5 capas, por lo que el modelo posee un total de 8.280 celdas.

En términos de dominio temporal, se establece un tiempo de simulación de 445 días, dado que en esa extensión de tiempo (entre Enero del 2008 y Marzo de 2009) se tienen los datos necesarios para el ajuste del modelo. Para la discretización temporal se sigue la recomendación del programa y se estableció una cantidad de 10 pasos de tiempo. Posteriormente pudo comprobarse que en menos de 4 pasos de tiempo podía haber problemas en la convergencia del modelo.

4.2.3. Definición de celdas inactivas (flujo nulo)

Las celdas marcadas como inactivas corresponden a la roca sana, en este caso, las formaciones montañosas en los bordes norte y sur del modelo. Cabe mencionar que al estar la galería excavada en roca en sus tramos inicial y final, dichos tramos quedarán definidos en el modelo como inactivos.

En la figura 7 se muestra el modelo en planta y en la figura 8 un corte longitudinal en la zona cercana a la galería destacada en la planta (columna n°4).

Figura 7.- Vista en planta del modelo

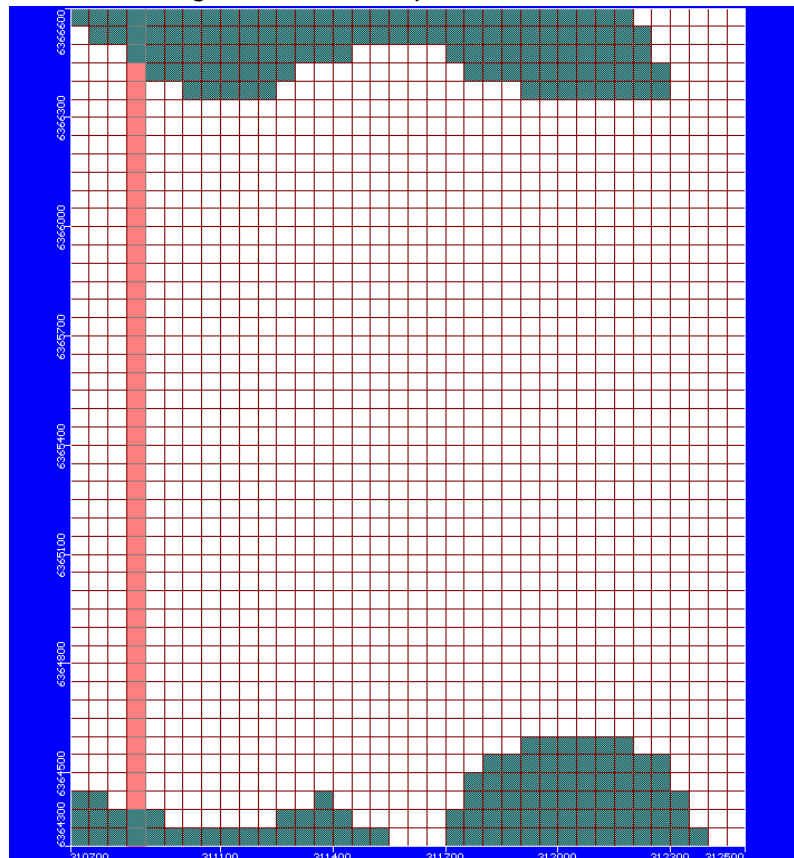
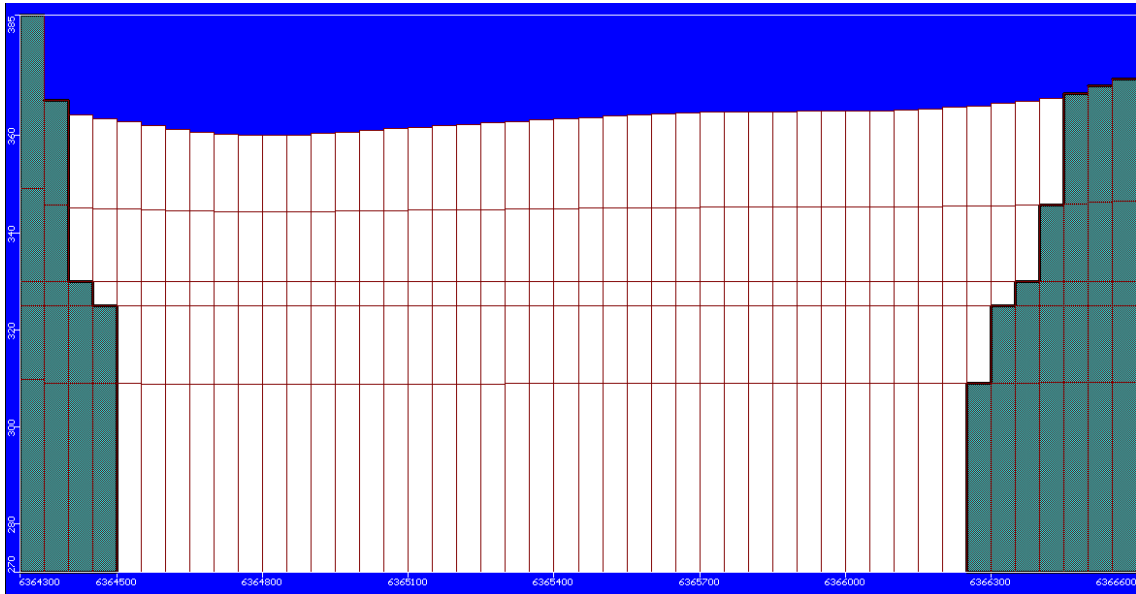
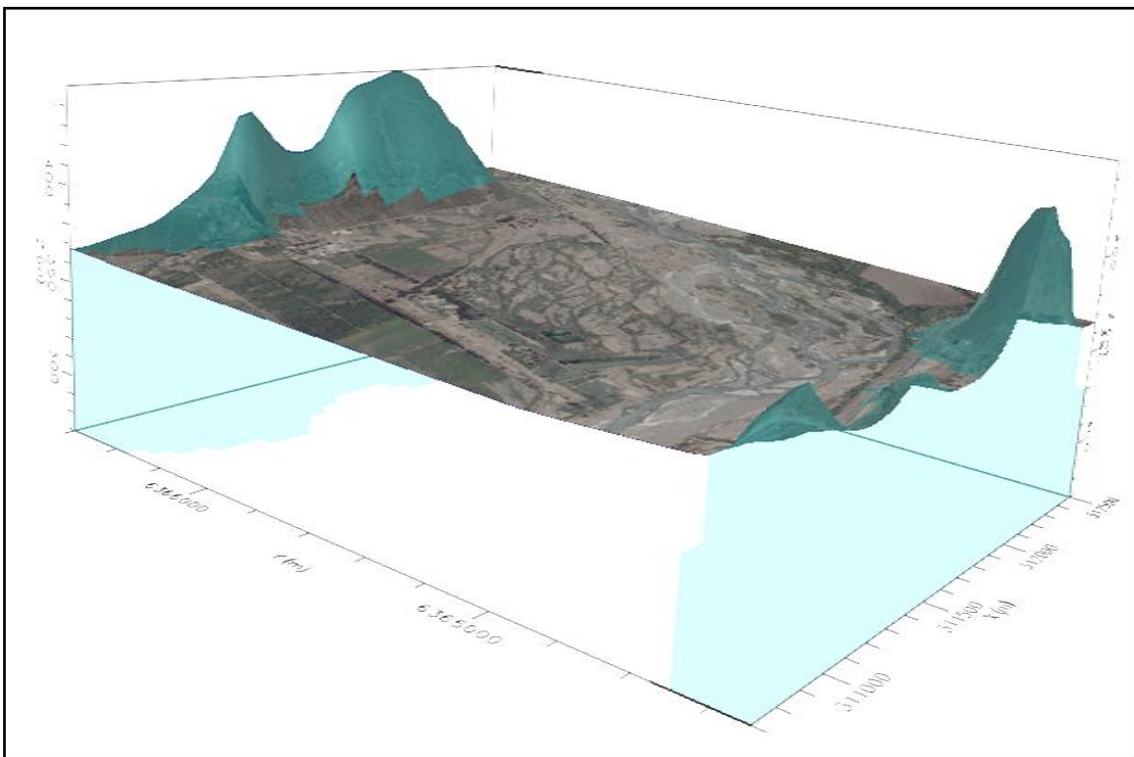


Figura 8.- Vista en corte del modelo a lo largo de la columna nº4.



Adicionalmente en la figura 9 se muestra una vista en tres dimensiones del modelo, habiéndosele agregado una imagen satelital de la zona abarcada a modo de referencia. La zona en color verde es la zona de flujo nulo.

Figura 9.- Vista 3D del modelo



4.3. Entrada de características del suelo

En esta sección se detalla la asignación de las características hidrogeológicas del terreno a los elementos del modelo. Las características a introducir son: la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, la porosidad y los parámetros de la fórmula de van Genuchten.

4.3.1. Conductividad hidráulica

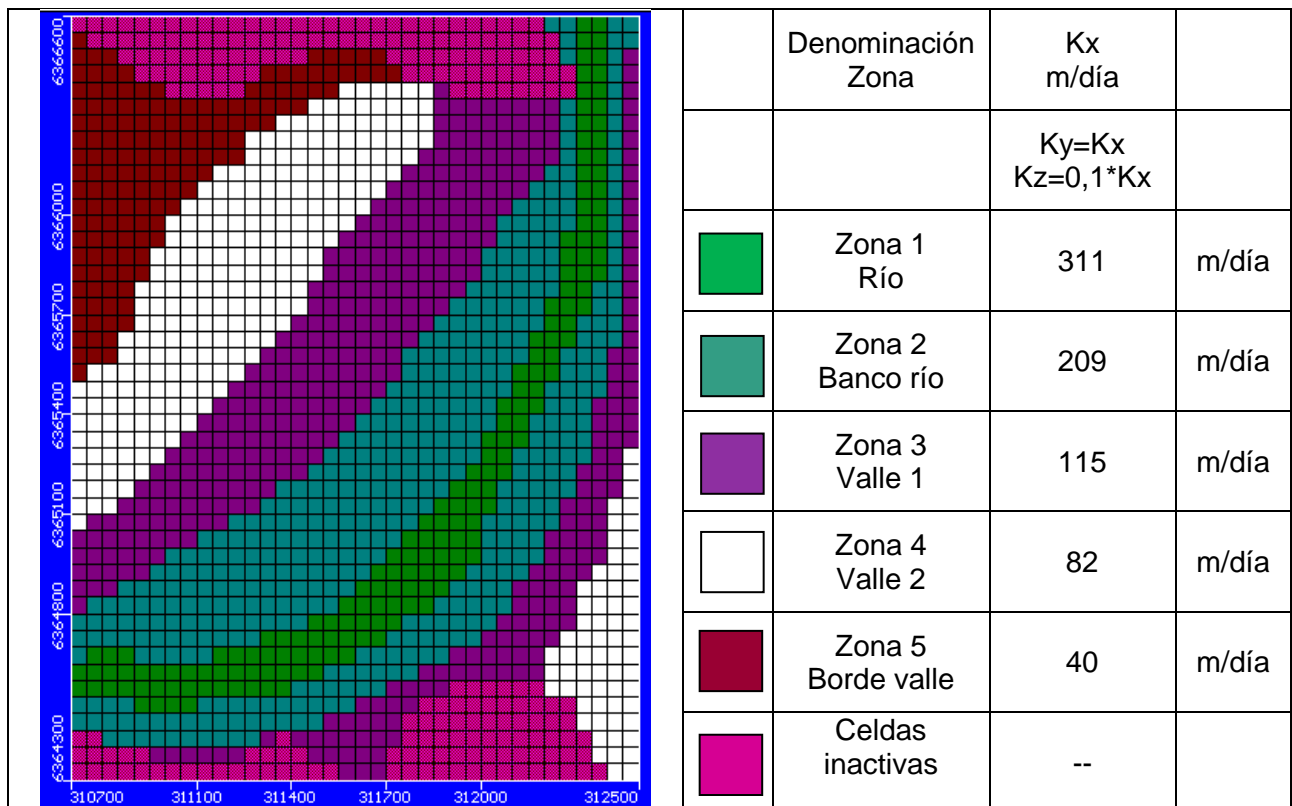
La conductividad hidráulica del terreno a considerar en el presente trabajo se obtiene de estudios en terreno realizados en el momento de construcción de la galería y de los modelos hidrogeológicos construidos para la cuenca del río Aconcagua (ver punto 3.5).

Los resultados de los estudios de construcción se resumen en dos valores para conductividad hidráulica, cada uno correspondiente a una sección de la zona de estudio:

- Zona del valle: $K = 54,1$ [m/día], zona del río: $K = 269,4$ [m/día]

Ahora bien, los modelos hidrogeológicos construidos para la cuenca sugieren una distribución más gradual de la conductividad hidráulica entre valores de 600 y 5 [m/día], por lo que se adopta un conjunto de cinco valores que pretenden representar dicho aspecto.

Figura 10.- Conductividad hidráulica.



4.3.2. Capacidad, retención y porosidad

En el caso de los coeficientes de capacidad y retención específica se utilizaron valores considerados razonables debido a los tipos de suelo presente. En efecto, con los datos de granulometría y contenido de tipos de suelos entregados en el informe del proyecto de construcción del dren, se busca en la base de datos de suelos ROSETTA las características para cada estrato. Además, se recogen los valores considerados en los modelos hidrogeológicos encargados por la DGA para tener un punto de comparación con valores más ampliamente aceptados. El resultado fue la definición de tres estratos, el primero abarca desde la superficie hasta unos 10 a 15 [m] de profundidad, el siguiente desde ese punto hasta la clave del dren y el tercero desde la clave del dren hasta el límite inferior del modelo.

Los valores a considerar se muestran en la tabla 1:

Tabla 1.- Coeficientes de capacidad y retención específica para cada estrato.

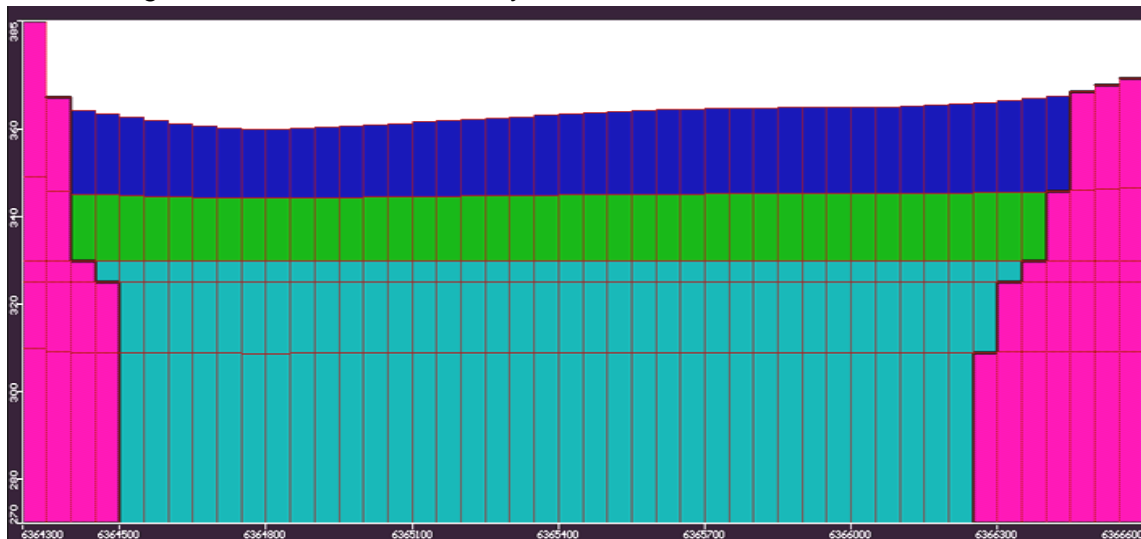
Estrato	S_γ (Capacidad específica)	S_s (Retención específica)
[-]	[-]	[1/m]
Estrato superior	0,25	0,0007
Estrato medio	0,12	0,0010
Estrato inferior	0,07	0,0012

El mismo criterio se utilizó para adoptar un valor de porosidad efectiva, que además será considerada idéntica a la porosidad total. Para cada estrato se tendrán las porosidades entregadas en la tabla 2:

Tabla 2.- Porosidades total y efectiva para cada estrato

Estrato	n_e (Porosidad total)
[-]	[-]
Estrato superior	0,25
Estrato medio	0,34
Estrato inferior	0,42

Figura 11.- Estratos definidos y distribución de coeficientes detallados.



4.3.3. Parámetros para fórmula de van Genuchten

La fórmula de van Genuchten es un modelo propuesto por un científico de la Universidad de California en el año 1980, y pretende generar una ecuación simple para predecir la conductividad hidráulica de suelos no saturados. Previamente se solía trabajar con modelos que relacionaban dicho parámetro con la curva de retención de humedad del suelo, o bien con fórmulas analíticas como la de Brooks y Corey. La fórmula de van Genuchten para la conductividad relativa es:

$$K_{rw} = S_e^{0.5} * \left[1 * \left(1 - S_e^{\frac{1}{\gamma}} \right)^\gamma \right]^2$$

También describe la relación entre la carga hidráulica y la saturación:

$$S_e = \frac{(S_w - S_{wr})}{(1 - S_{wr})} = \frac{1}{[1 + (\alpha * h_c)^\beta]^\gamma} \dots \text{para } \varphi < 0$$
$$1 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \text{para } \varphi \geq 0$$

Donde,

K_{rw} = Conductividad relativa

S_e = Saturación efectiva

S_w = el grado de saturación, depende de la carga hidráulica

S_{wr} = saturación residual

α y β = parámetros empíricos, α tiene dimensiones 1/Longitud y β no tiene dimensión

h_c = carga capilar definida como $h_{ap} - \varphi$

h_{ap} = presión atmosférica

Los parámetros β y γ están relacionados por $\gamma = 1 - 1/\beta$

Los parámetros empíricos (α , β y S_{wr}) pueden ser medidos en laboratorio al graficar una curva suelo-contenido de agua. El parámetro α controla la entrada de aire, mientras más chico sea, mayor la tensión capilar sobre el nivel del agua. Las gravas y arenas tienen un gran α mientras suelos arcillosos tienen α pequeños. El parámetro β controla que tan rápido la saturación cae desde 1 a 0 y es un indicador del tamaño de los granos (un suelo bien graduado tiene un alto β). Por último, el valor de la saturación residual depende de muchos factores del suelo, pero típicamente es bajo para arenas y gravas y alto para suelos arcillosos (puede tomar valores entre 0,01 y 0,4).

Para encontrar los valores aplicables a la zona en estudio, se trabaja con la granulometría mencionada en el punto anterior, datos con los que se busca en la base de datos ROSETTA, la que entrega los parámetros a , b y S_{wr} de conductividad no saturada. Los resultados de dicha búsqueda se muestran a continuación en la tabla 3.

Tabla 3.- Parámetros de la zona no saturada (entre paréntesis la denominación usada por Visual MODFLOW).

Estrato [-]	α (VANAL) [1/m]	β (VANBT) [-]	S_{wr} (VANSR) [-]
Estrato superior	4,3511	1,7378	0,0411
Estrato medio	3,1347	1,3621	0,0493
Estrato inferior	2,3900	1,2741	0,0657

4.4. Definición condiciones de borde

Las condiciones que rigen el flujo subterráneo en la zona de estudio también deben ser introducidas al modelo, lo que se hace definiendo condiciones de borde en Visual MODFLOW, programa que cuenta con una gama de clases de condiciones que en general deberían poder representar gran parte de los fenómenos comúnmente estudiados.

En el presente estudio se tienen cuatro condiciones de flujo principales que gobiernan el fenómeno a estudiar. A continuación en la tabla 4 se presenta cada una de ellas acompañadas por una breve descripción y además se indica la condición con la que se representará en Visual MODFLOW.

Tabla 4.- Condiciones de borde a representar.

Condición real	Descripción	Condición modelo
Río Aconcagua	Este curso de agua bordea la zona de captación de la galería, aportando en el camino una fracción de agua hacia el acuífero.	Stream
Flujo subterráneo desde aguas arriba	Es el flujo subterráneo que proviene desde aguas arriba. Incluye flujo desde la primera sección del río, la parte de la segunda sección no incluida en el modelo, y además el flujo subterráneo de las sub-cuencas de Llay-Llay y Putaendo.	Wells
Lagunas de infiltración	Recarga artificial producida por retención de agua superficial en obras construidas específicamente para dicho propósito. Se modelan distintos escenarios de recarga, es decir, presencia de más o menos lagunas.	Recharge
Galería Las Vegas	Captación subterránea ubicada entre 30 y 40 [m] bajo la superficie. Se extiende de norte a sur cruzando longitudinalmente toda la extensión del modelo.	Drain

A continuación se trata más a fondo el proceso de modelación de cada una de las condiciones ya mencionadas.

4.4.1. Infiltración desde río Aconcagua

Para representar la presencia del río Aconcagua en el modelo se usa una condición de borde del tipo *Stream*.

La condición de borde tipo *Stream* tiene como función representar sistemas de flujo en los que interactúan varios cursos de agua, pudiéndose definir, por ejemplo, si unos son tributarios de otros, los puntos de entrega y los caudales que lleva cada uno por sección. La diferencia principal con la condición de borde tipo *River* es que la condición *Stream* admite introducir directamente el caudal pasante por las celdas especificadas, mientras que la condición tipo *River* sólo trabaja en base a un valor de carga piezométrica que vendría siendo el eje hidráulico del río para cierto caudal.

Los datos requeridos por la condición de borde son:

- Día de comienzo
- Día de término
- Cota de aguas libre
- Cota superior de lecho del río
- Cota inferior de lecho del río
- Ancho de la sección transversal
- Caudal de entrada
- Conductividad hidráulica vertical de lecho del río

Los datos de día de comienzo y día de término permiten introducir variación de las restantes características a lo largo del tiempo total de simulación, facilitando, por ejemplo, describir la variación mensual del caudal.

La condición de borde permite la construcción de varios segmentos de río, lo que es de alta utilidad en casos de variaciones importantes de pendiente o de sección transversal. En el caso estudiado se consideró solamente un segmento y dado que el río en la zona de estudio no presenta cambios bruscos se estima que es suficiente para representarlo fielmente.

Los valores adoptados para definir la condición de borde se muestran en la tabla 5.

Tabla 5.- Parámetros- Condición de borde *Stream*.

Dato	Unidad	Punto inicial	Punto final	Comentario
Día de comienzo	[día]	0	0	01 Ene 2008
Día de término	[día]	455	455	31 Mar 2009
Cota de aguas libre	[m]	371	358.5	
Cota superior lecho	[m]	366	356	
Cota inferior lecho	[m]	363	354	
Ancho transversal	[m]	40	40	
Caudal de entrada	[m ³ /día]	2.592.000	2.592.000	QMM' = 30 m ³ /s
K _z lecho	[m/día]	290	290	

Para los valores de cotas se contaba con datos de topografía anterior al presente estudio, además de observaciones realizadas en terreno. Con respecto al caudal de entrada se considera mejor utilizar un valor constante y cercano al caudal medio mensual. El caudal medio mensual en la estación Aconcagua en Romeral es igual a 34,65 m³/s, para la simulación se opta por adoptar un valor un poco menor para estar en el lado conservador, así el valor adoptado es igual a 30 [m³/s], equivalente a 2,6 [millones de m³/año].

4.4.2. Flujo subterráneo desde aguas arriba

Para representar el flujo subterráneo proveniente de aguas arriba, se elige utilizar pozos de bombeo para inyectar el caudal en el borde del modelo. Entre las alternativas disponibles para representar la entrada de agua están los ya mencionados pozos de bombeo, haber generado una zona de recarga o utilizar una condición del tipo *General Head*. La desventaja de una zona de recarga es que ésta hubiera sido superficial, mientras que se intenta representar un flujo que tiene lugar varios metros bajo la superficie. Por otro lado, en el caso de una condición de borde *General Head*, el caudal efectivo que entra depende fuertemente de las condiciones hidráulicas, especialmente de la diferencias de nivel entre la carga definida por *General Head* y el nivel de la napa en la zona del modelo, por lo que se tendría una condición de borde que entrega un caudal variable y difícil de definir (se define una altura piezométrica, por lo que habría que calcular qué diferencia de cargas produce el flujo requerido).

Dado lo anterior, se elige simular el flujo subterráneo entrante con una batería de pozos de bombeo inyectando entre todos un caudal equivalente a dicho flujo.

El caudal de entrada se estima a partir de los modelos de simulación hidrogeológica de la DGA, los que son actualizados cada cierta cantidad de años. En los modelos base, normalmente se modela un caudal subterráneo de entrada a la segunda sección cercano a los 10 m³/s, el que se postula que va siendo recuperado por el río debido a la poca profundidad de la napa. Considerando que la zona estudiada en el presente trabajo se encuentra cercana al último tercio de la segunda sección, se había considerado inicialmente un caudal subterráneo de entrada al modelo de 3 m³/s. Ahora bien, la última actualización del modelo hidrogeológico se concentra en la primera sección pero en sus conclusiones advierte que los caudales subterráneos están sobreestimados en los modelos anteriores, principalmente porque el río recupera más de lo estimado, y finalmente propone que el caudal subterráneo pasante a la segunda sección tiene un valor de entre 2 y 3 [m³/s].

Suponiendo un valor del caudal subterráneo de entrada a la segunda sección igual a 2,5 [m³/s] y considerando que a la zona de estudio llegue un 35,2% de dicho caudal (porcentaje calculado a partir de la variación de la cota del río a lo largo de la segunda sección), se llega a un valor para el caudal entrante aguas arriba de 880 [l/s].

Ahora bien, se tiene espacio para instalar 49 pozos de inyección a lo largo del borde del modelo, por lo que cada pozo inyecta una fracción igual del caudal total, lo que corresponde a un caudal de inyección igual a 1.551,7 [m³/día]. Cada pozo funciona los 455 días de la simulación, su criba se extiende desde la cota 350 hasta el fondo del modelo (cota 270).

4.4.3. Infiltración desde lagunas

Las lagunas de infiltración son estructuras que sirven para retener el agua proveniente del rebalse ubicado a la entrada de los predecantadores. Estas obras se introducen en el modelo como una condición de borde de tipo *Recharge*, es decir, una recarga superficial unitaria por unidad de área.

Los datos requeridos por la condición de borde son:

- Día de comienzo.
- Día de término.
- Tasa de recarga.

Como alternativa a utilizar una condición de recarga existen las condiciones de borde Constant Head (Carga piezométrica constante) y General Head (Carga piezométrica general), pero ambas presentan el problema que pasan a considerar la zona entre la napa y la condición de borde como suelo saturado. Por ejemplo, si la napa tiene un nivel estático de 350 [m.s.n.m.] y se define una condición de borde de carga piezométrica constante igual a 370 [m.s.n.m.], automáticamente se modela como si en las celdas con dicha condición, la napa se encontrara a 370 [m.s.n.m.] y no a 350 [m.s.n.m.], pasando por alto el proceso de saturación gradual, o, al menos, reduciéndolo considerablemente. Algo similar pasa con la condición de carga piezométrica general, siendo la diferencia que en su caso la condición influye sobre el nivel de la napa desde lejos, o, al menos no desde la misma celda donde se define.

En la fase de construcción del modelo se utiliza entonces una condición de borde de tipo recarga superficial para simular dos conjuntos de lagunas construidos en un período de tiempo similar. Cada conjunto de lagunas posee una tasa de recarga diferente, la que es ajustada en sucesivas simulaciones para llegar a los valores históricos de caudal captado por el dren. El primer conjunto se ubica cerca de los predecantadores, se designa conjunto norte. El segundo conjunto se designa conjunto sur y está en el borde del recinto, cerca del río.

4.4.4. Dren de captación

La galería subterránea Las Vegas corresponde a una captación horizontal construida varios metros bajo la superficie del terreno. Para efectos del presente trabajo será representada con una condición de borde del tipo *Drain*, es decir, con un dren subterráneo caracterizado principalmente por su cota de captación y la conductancia de su manto.

Se puede observar en los planos del proyecto original que la cota de radier inicial es de 328 [m] en la primera cámara, desde la cual la galería desarrolla una pendiente de 0,5‰ hasta la cámara 11 donde empalma al túnel que conduce el agua hasta su destino aguas abajo. Considerando estos datos se adopta un valor de cota de captación del dren de 330 [m].

El valor inicial de la conductancia fue adoptado desde uno de los modelos hidrogeológicos de la DGA, donde se le asignaba una conductancia de 20000 [m²/día].

4.5. Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se procede a seleccionar datos históricos del funcionamiento de la galería subterránea, específicamente interesa contar con el caudal captado por ésta, además de las condiciones de flujo del río y el estado de las lagunas para el mismo período de tiempo.

El análisis se realiza con los datos comprendidos entre los días 01/01/2008 y 31/03/2009, período especialmente interesante si se considera que en el mes de enero de 2008 se construyeron alrededor de 15 lagunas, las que para efectos de la simulación comienzan su pleno funcionamiento en abril del 2008.

A continuación en la tabla 6 se muestran los datos disponibles para el período:

Tabla 6.- Período a utilizar en calibración

Mes	Q Medio Mensual Dren Las Vegas [m ³ /seg]	Actividad lagunas norte Si/No	Actividad lagunas sur Si/No
Ene/08	1,06	No	No
Feb/08	0,94	No	No
Mar/08	0,97	No	No
Abr/08	1,02	Si	Si
May/08	1,08	Si	Si
Jun/08	1,22	Si	Si
Jul/08	1,17	Si	Si
Ago/08	1,29	Si	Si
Sep/08	1,24	Si	Si
Oct/08	1,13	Si	Si
Nov/08	1,22	Si	Si
Dic/08	1,18	Si	Si
Ene/09	1,11	No	Si
Feb/09	1,06	No	Si
Mar/09	1,02	No	Si

El procedimiento adoptado para la calibración consiste en los siguientes pasos:

- En primer lugar, se ajustan los parámetros para que el caudal captado por el dren en el período en que todavía no están funcionando las lagunas, sea el correspondiente al promedio de dichos meses. Es este paso el que fija la conductividad del dren.
- Con los parámetros iniciales definidos se observa el comportamiento del modelo en los períodos con recarga activa, si no se obtienen los resultados requeridos, se deben modificar los parámetros, pero evitando modificar la conductancia del dren, es decir, variar la conductividad hidráulica, tasa de recarga e incluso el coeficiente de almacenamiento.
- Al modificar la conductividad u otro parámetro se debe fijar la conductancia del dren nuevamente.

A continuación se describe la secuencia del desarrollo de la calibración:

- El promedio del caudal captado por el dren en los meses sin lagunas activa es igual a 988,5 [l/s], equivalentes a 85.406 [m³/día]. La conductancia que permite que el dren capte dicho caudal es igual a 101 [m²/día].
- Con la conductancia mencionada el dren capta 92.345 [m³/día] en el segundo período (que corresponde a cuando ambos conjuntos de lagunas están activas) y 88.078 [m³/día] en el tercer período (sólo el conjunto sur de lagunas activo). Los valores esperados son 101.226 [m³/día] (1171,6 [l/s]) para el segundo período y 91.826 [m³/día] (1062,8 [l/s]).
- Se aumentan las tasas de recarga de ambos hasta que el segundo período llega a su valor, pero se hace difícil apreciar la diferencia necesaria entre el segundo y tercer período (~10.000 [m³/día]). Las tasas de recarga quedan: 83.980 [mm/año] para el conjunto norte y 172.917 [mm/año] para el conjunto sur. Los caudales captados son 101.312 [m³/día] en el segundo período y 96.931 [m³/día] en el tercer período.
- Se modifican las conductividades de forma de hacer más gradual el cambio de las conductividades en la extensión del recinto. Aumenta el caudal captado, pero en forma relativamente similar para los tres períodos, en consecuencia, se debe modificar otro parámetro que influya sobre la amplitud de los cambios.
- Se modifican los coeficientes de almacenamiento, disminuyendo sus valores en un orden de magnitud. Se aprecia un aumento de la amplitud importante. Caudales captados por período: 91.333 [m³/día], 104.697 [m³/día] y 97.111 [m³/día].
- Se ajusta la conductancia para reducir el caudal captado al esperado. Nuevo valor de la conductancia es 96 [m²/día]. Caudales captados son: 85.398 [m³/día], 98.713 [m³/día] y 91.458 [m³/día].
- Se modifican las tasas de recarga. Dado que una de las tasas es la única activa en el tercer período, se ajusta esa hasta llegar al valor esperado en dicho período. Una vez ajustado el tercer período, se modifica la tasa de recarga que sólo está activa en el segundo para ajustar el segundo. Finalmente, los valores de las tasas de recarga son: 98.410 [mm/año] para el conjunto norte y 139.121 [mm/año] para el conjunto sur.
- Por período, el caudal captado y el caudal observado se presentan en la tabla 7:

Tabla 7.- Resultados calibración

Período	Caudal dren - Simulado	Caudal dren - Observado
Período 1 (sin lagunas)	85.402	85.406
Período 2 (dos conjuntos)	101.420	101.226
Período 3 (conjunto sur)	91.826	91.826

5. OPERACIÓN

En este capítulo se presenta la utilización del modelo construido para analizar las variables de diseño del sistema de recarga artificial de la PTAP Las Vegas, y, de acuerdo a los resultados de dichos análisis, proponer la configuración que maximiza el aporte del dren Las Vegas al sistema de producción de agua potable del mismo nombre.

El sistema de recarga artificial a utilizar consiste en conjuntos de lagunas de infiltración, alternativa que se considera más adecuada a las condiciones del recinto que otras formas de infiltración como pozos de inyección y enbancamiento del río. En efecto, los pozos profundos de inyección requieren que el agua infiltrada presente baja turbiedad o de lo contrario un régimen de acondicionamiento permanente, lo que se traduce en costos de operación elevados, mientras que, obras que consistan en el enbancamiento del río requieren un método constructivo que asegure su permanencia en el tiempo, por ejemplo, que las obras no pierdan su utilidad después de una crecida del río, lo que a la vez se traduce en costos de construcción mucho más altos que los de las lagunas de infiltración.

En el proceso de definir las características de las lagunas de infiltración se deben responder, como mínimo, las siguientes preguntas: ¿Qué sector del recinto de la PTAP Las Vegas es el mejor para ubicar las lagunas?, ¿Cuál es el esquema de emplazamiento y la forma de construcción de las lagunas?, ¿Qué restricciones deben cumplir las dimensiones de las lagunas y sus obras asociadas?, y, por último, ¿Cuál es el procedimiento que se considera para la mantención de las lagunas?. En las siguientes secciones se presentan las respuestas a éstas interrogantes.

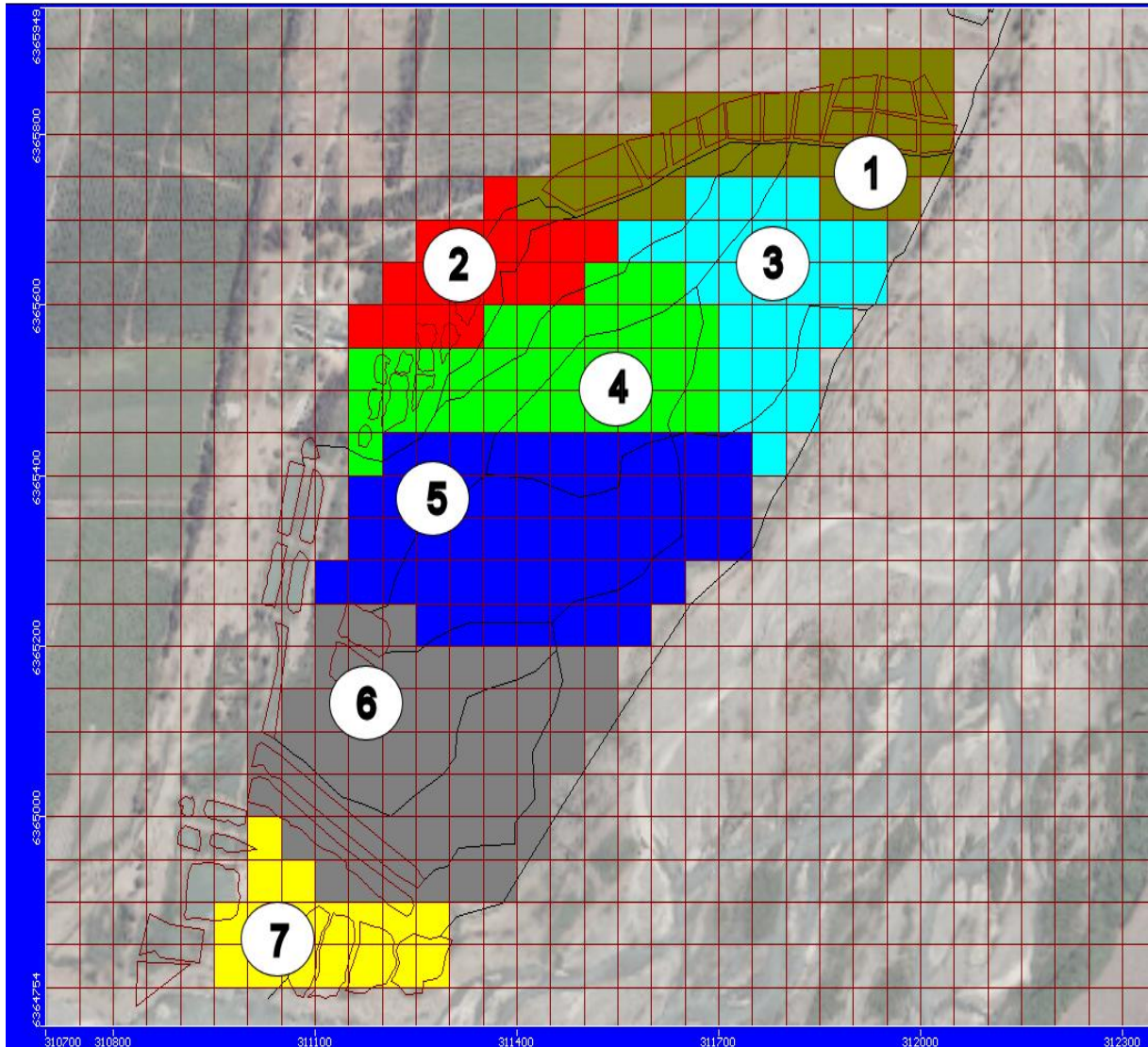
5.1. Ubicación de las obras de recarga artificial

Como primera aplicación del modelo construido en el presente trabajo, se procede a estudiar la ubicación recomendada de obras de recarga artificial dentro del recinto de la PTAP Las Vegas.

En el presente estudio se considerado todo el recinto de la PTAP Las Vegas como posible ubicación de las lagunas a proponer, siendo entonces necesario establecer para cada sector de dicho recinto, el efecto sobre el caudal captado de utilizar cada sector para recarga, efecto cuya magnitud está dada por la tasa de caudal infiltrado por unidad de superficie.

El primer paso es analizar la información sobre las tasas de infiltración superficial en todo el recinto del documento “Estudio de infiltración superficial - Recinto PTAP Las Vegas”, (Apéndice C). Dicha información permite separar el recinto en seis zonas, cada una con un valor referencial de tasa de recarga. Las zonas individualizadas son ingresadas al modelo de Visual MODFLOW, quedando la distribución de tasas de recarga superficial que se presenta a continuación en la figura 12.

Figura 12.- Zonas de recarga definidas



Para cuantificar la tasa de recarga de cada zona se procede a realizar una simulación en el modelo, comparando la condición de recarga nula y la condición producida por asignar una tasa de recarga fija a la zona en análisis.

La tasa de recarga superficial adoptada para ejecutar las simulaciones es igual a 100.000 [mm/año], la que se establece activa desde la mitad del tiempo de simulación, de forma de recoger como resultado útil el caudal captado por el dren en los períodos con ausencia y presencia de recarga.

Ahora bien, dado que cada zona posee una superficie distinta, para que se puedan comparar los resultados, se opta por calcular la relación de caudal captado en el dren por cada hectárea inundada. En la tabla 8, se presentan los resultados de las simulaciones para cada zona definida:

Tabla 8.- Resultados simulaciones - valores de tasa de recarga determinado.

Zona inundada	Superficie zona inundada	Caudal dren sin recarga	Caudal dren con recarga	Aumento caudal captado por dren		Superficie zona inundada	Tasa recarga para zona
	[m ²]	[m ³ /día]	[m ³ /día]	[m ³ /día]	[l/s]	[Há]	[l/s/Há]
1	82.500	79.008	96.981	17.973	208,02	8,25	25,21
2	42.500	79.008	87.260	8.252	95,51	4,25	22,47
3	72.500	79.008	94.550	15.543	179,89	7,25	24,81
4	82.500	79.008	96.199	17.191	198,98	8,25	24,12
5	132.500	79.008	107.923	28.915	334,66	13,25	25,26
6	137.500	79.008	107.789	28.781	333,12	13,75	24,23
7	42.500	79.008	87.209	8.202	94,93	4,25	22,34

Dados los valores determinados, se propone priorizar la construcción de lagunas de infiltración en la zona 5, ubicada aproximadamente en la zona central del recinto de la PTAP Las Vegas. Si la superficie de la zona 5 fuera insuficiente para infiltrar el caudal que se requiere, se establece el orden de prioridad de las zonas de acuerdo al valor de la tasa de infiltración, es decir, después de la zona 5, las obras de recarga artificial se ubican, en orden descendente de preferencia, en: la zona 1, zona 3, zona 6, zona 4, zona 2 y zona 7.

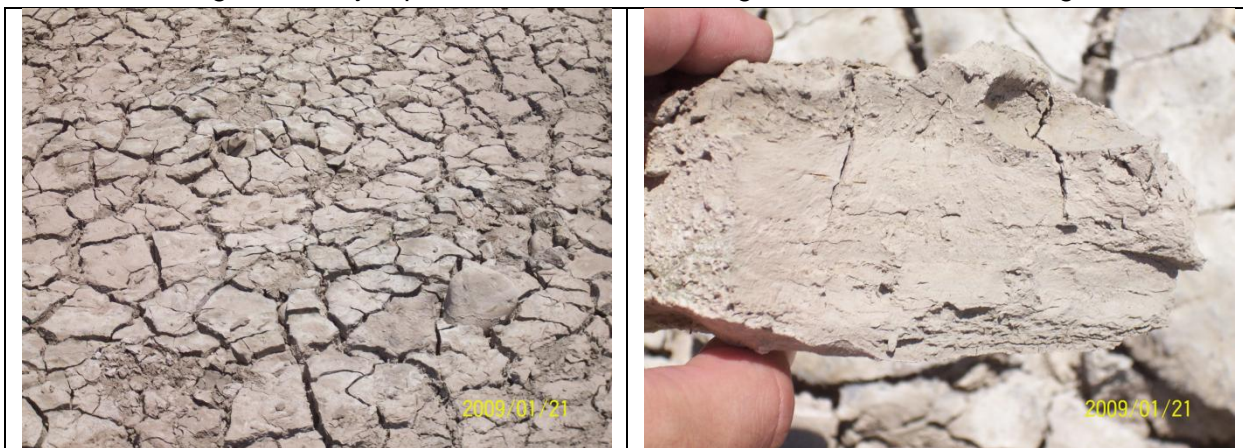
5.2. Lineamientos para construcción y mantenimiento de lagunas de infiltración

Una vez definida la zona más conveniente para emplazar las obras de recarga artificial, se plantea la necesidad de definir cuantitativamente dichas obras, es decir, la extensión y cantidad de lagunas de infiltración.

Las lagunas de infiltración deben ser diseñadas de forma tal que la altura de agua sobre la superficie del terreno sea cercana a 120 [cm], ya que menos carga sobre el terreno deja potencial de infiltración sin aprovecharse y una mayor carga produce problemas de compactación y consiguiente reducción de la capacidad de infiltración (Pérez-Paricio, 1998).

Por otro lado, uno de los principales problemas que debe enfrentar la recarga artificial de acuíferos es la colmatación del sistema utilizado, ya sea un sistema superficial como una laguna de infiltración, o un sistema de infiltración profunda como un sondaje. Como consecuencia directa de este fenómeno se tiene una capacidad de recarga severamente reducida. La colmatación de estos sistemas se produce por procesos físicos, biológicos y químicos, relacionados íntimamente con las características del agua a infiltrar, además de condiciones del terreno donde se emplacen las obras de recarga artificial. En el caso de lagunas de infiltración, los procesos son generalmente más lentos y con mejores posibilidades de recuperación. Las condiciones de terreno sugieren que el factor predominante entre los causantes de colmatación es la presencia de sólidos suspendidos en el agua, por sobre presencia de compuestos químicos que reaccionen con el suelo o algas que puedan tener crecimiento importante. En la figura 13 se presenta una muestra recogida en terreno desde una laguna que estuvo funcionando por un período de 9 meses en el recinto en estudio.

Figura 13.- Ejemplo colmatación en una laguna de la PTAP Las Vegas

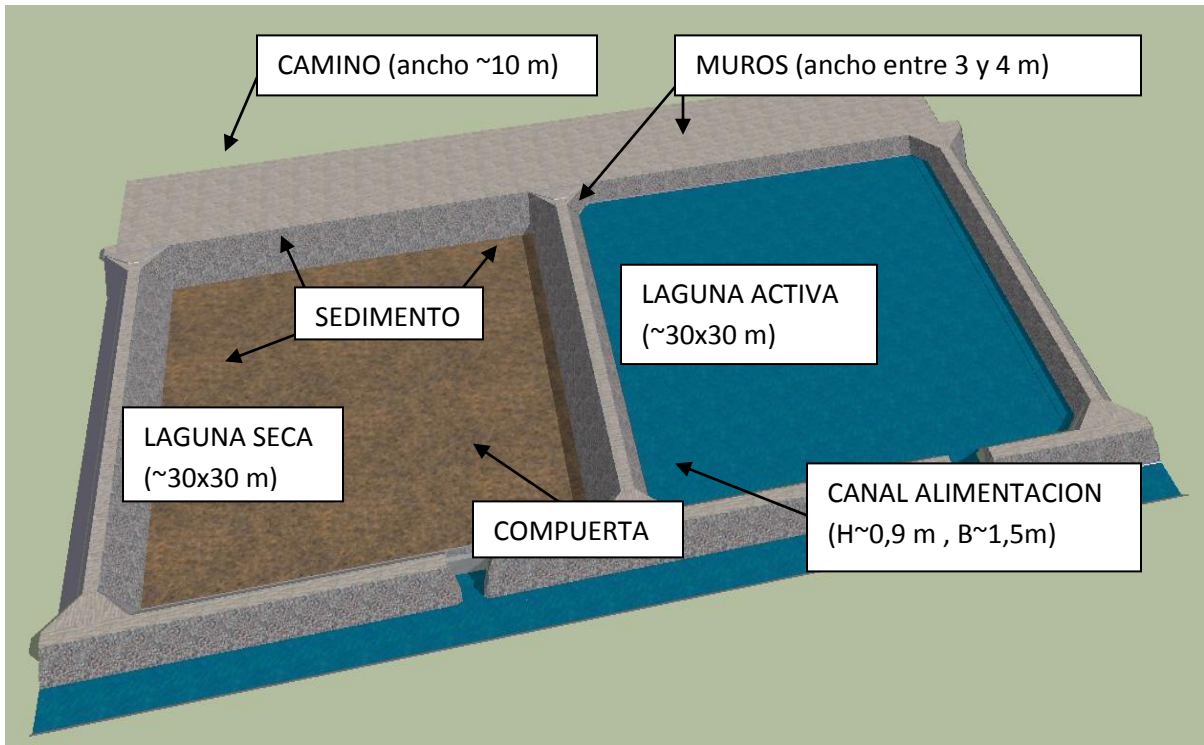


Considerando lo expuesto, se proponen los siguientes lineamientos para la construcción y mantenimiento de las lagunas de infiltración:

- Los muros de las lagunas se construyen mediante una acumulación de material granular, generalmente proveniente del mismo suelo donde se construyen.
- La forma de las lagunas es poligonal, con la menor cantidad de lados posibles, recomendándose un mínimo de cuatro lados. Además, idealmente la medida de cada lado debe ser cercana a 30 metros, lo que permite una superficie suficiente para infiltrar y la menor superficie se traduce en menos volumen de lodos que extraer en cada limpieza.
- Se debe habilitar un camino de servicio para tránsito de vehículos y maquinaria, de un ancho mínimo de 10 metros, permitiendo el tránsito en ambos sentidos y mayor espacio para realización de faenas.
- Las lagunas reciben agua desde un canal derivado del canal N°5 (el canal que actúa como desagüe de los predecantadores). Dicho canal debe ser construido a lo largo del lado opuesto del camino de servicio, tal que no sea necesario cruzar el canal al transitar al interior de la laguna.
- Se sugiere considerar la instalación de compuertas en cada laguna con el objetivo de facilitar y expeditar el corte de la entrada del flujo.
- Para ejecutar la limpieza de una laguna, se corta el flujo de agua a ésta, se introduce en la laguna un minicargador frontal, el que para entrar rompe el muro de la laguna que enfrenta al camino y por dicho espacio evacúa los lodos de sedimento. Dichos lodos se secan afuera de la laguna y son transportados fuera del recinto una vez secos, lo que permite poner en servicio la laguna nuevamente en forma expedita.

En la figura 14 se muestra un esquema del emplazamiento y características principales del sistema de lagunas de infiltración propuesto:

Figura 14.- Ejemplo dimensiones de lagunas y obras asociadas.



Considerando el esquema propuesto se calcula que la superficie efectiva de infiltración corresponde a un 85,7% de la superficie total utilizada en las obras, factor que debe ser tomado en cuenta a la hora de calcular la superficie total a utilizar para satisfacer una determinada demanda de caudal.

5.3. Caudales

A continuación, se entregan los resultados para distintos escenarios de funcionamiento del dren, en función del caudal captado objetivo.

- Caudal objetivo a captar = 1.000 [l/s]

Caudal captado sin recarga = 79007,79 [m³/dia] = 914,44 [l/s]

Simulando la situación en Visual MODFLOW, se llega a la conclusión de que se deben inundar 4 [Há] de terreno en la zona 4. Adicionalmente, considerando que dicha cantidad representa el 85,7% de la superficie requerida por el sistema (ver sección anterior), se tiene entonces que se requieren 4,67 [Há] en la zona 4.

Caudal captado con recarga = 86633,39 [m³/dia] = **1002,7 [l/s]**

- Caudal objetivo a captar = 1.100 [l/s]

Caudal captado sin recarga = 79007,79 [m³/dia] = 914,44 [l/s]

Simulando la situación en Visual MODFLOW, se llega a la conclusión de que se deben inundar 7,5 [Há] de terreno en la zona 4. Adicionalmente, considerando que dicha cantidad representa el 85,7% de la superficie requerida por el sistema (ver sección anterior), se tiene entonces que se requieren 8,75 [Há] en la zona 4.

Caudal captado con recarga = 95229,76 = [m³/dia] = **1102,2 [l/s]**

- Caudal objetivo a captar = 1.200 [l/s]

Caudal captado sin recarga = 79007,79 [m³/dia] = 914,44 [l/s]

Simulando la situación en Visual MODFLOW, se llega a la conclusión de que se deben inundar 11 [Há] de terreno en la zona 4. Adicionalmente, considerando que dicha cantidad representa el 85,7% de la superficie requerida por el sistema (ver sección anterior), se tiene entonces que se requieren 12,84 [Há] en la zona 4.

Caudal captado con recarga = 103.771 [m³/dia] = **1201,1 [l/s]**

- Caudal objetivo a captar = 1.250 [l/s]

Caudal captado sin recarga = 79007,79 [m³/dia] = 914,44 [l/s]

Simulando la situación en Visual MODFLOW, se llega a la conclusión de que se deben inundar 11,25 [Há] de terreno en la zona 4 y 3,5 [Há] en la zona 1. Adicionalmente, considerando que dicha cantidad representa el 85,7% de la superficie requerida por el sistema (ver sección anterior), se tiene entonces que se requieren 12,84 [Há] en la zona 4 y 4,13 [Há] en la zona 1.

Caudal captado con recarga = 108.651 [m³/dia] = **1250,7 [l/s]**

- Caudal objetivo a captar = 1.300 [l/s]

Caudal captado sin recarga = 79007,79 [m³/dia] = 914,44 [l/s]

Simulando la situación en Visual MODFLOW, se llega a la conclusión de que se deben inundar 11,25 [Há] de terreno en la zona 4, 7 [Há] en la zona 1 y 2,25 [Há] en la zona 3. Adicionalmente, considerando que dicha cantidad representa el 85,7% de la superficie requerida por el sistema (ver sección anterior), se tiene entonces que se requieren 12,84 [Há] en la zona 4, 8,17 en la zona 1 y 2,63 en la zona 3.

Caudal captado con recarga = 103.771 [m³/dia] = **1301,8 [l/s]**

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta una forma de enfrentar el problema de la escasez de agua en el mundo, si bien no es una solución inmediata e infalible – ninguna lo es – es una alternativa en un campo en el que éstas nunca sobran.

Se sigue una estructura de trabajo en que la base de todo lo constituyen los datos reales con los que se pueda comparar resultados y emitir juicios con un buen respaldo.

La construcción del modelo presenta interesantes cuestionamientos, entre ellos la razón de la gran variación entre la conductancia del dren usada en los modelos hidrogeológicos de la DGA y la conductancia resultante de la calibración. Una posible explicación es que los distintos parámetros hidrogeológicos y un nuevo enfoque del modelo combinarse para que en vez de ser el dren el que deja pasar gran cantidad de agua, es el que limita la cantidad que entra, por ejemplo, si en los modelos hidrogeológicos se usaron condiciones en las que había disponible un menor volumen de agua en el acuífero, así se hacía necesaria una mayor conductancia para dejar pasar todo lo posible.

El resultado entregado por el modelo plantea que es necesario inundar una superficie cercana a un cuarto del recinto adyacente a la PTAP Las Vegas para aumentar el caudal captado por el dren a 1250 l/s. Dicha superficie equivale a cerca de 17 [Há], y se estima que deben ser construidas entre 30 y 70 lagunas, dependiendo de las dimensiones de éstas.

Se insiste en que una infraestructura adecuada asociada a las lagunas debe ser considerada si se espera planificar el sistema de recarga artificial para que siga funcionando al mediano plazo.

Con un adecuado estudio de la demanda de las localidades abastecidas, y una vez constatado la validez de lo planteado por el modelo construido, se pueden optimizar los costos de operación reduciendo la carga de trabajo de las plantas convencionales al contar con mayor caudal captado por el dren. Cabe mencionar que el acueducto Las Vegas puede no ser suficiente para conducir todo el caudal captado por el dren, en cuyo caso se propone aprovechar el caudal captado en otras localidades más cercanas.

Se debe mencionar que la recarga artificial de acuíferos, si bien quizás no la opción más directa, es una manera destacable de manejar los recursos hídricos, abriendo posibilidades de mejora para casos de contaminación, salación, y sobre-explotación de acuíferos. Se observa, dadas las experiencias nacionales e internacionales, que ésta técnica, en combinación con otras obviamente, puede ser una parte no menor de la respuesta a la creciente escasez del vital recurso hídrico.

Sobre los resultados

El resultado relevante para la operación del sistema de producción de agua potable Las Vegas viene a ser la determinación de la superficie que se necesita inundar para captar un

cierto caudal, el que normalmente es definido según la demanda de agua potable de las localidades abastecidas. Las variables a considerar al evaluar la validez del resultado corresponden principalmente a restricciones constructivas, ya que para calcular la superficie necesaria se asume una tasa de recarga constante e idéntica para toda la superficie. En condiciones de terreno, dicha tasa puede ser mayor o menor dependiendo de la disponibilidad de agua, de la altura de carga sobre la superficie y tiempo de retención de cada laguna.

Ahora bien, se estima que la disponibilidad de agua no es un problema que deba preocupar, ya que, como fue mencionado en capítulos anteriores, la captación que abastece el sistema productivo Las Vegas capta casi el doble del caudal tratado por las plantas convencionales, es decir, todo el caudal que no se usa, potencialmente puede ser infiltrado.

Con respecto a la altura de agua y el tiempo de retención, ambas son variables controlables en la medida que las lagunas sean diseñadas correctamente. El tiempo de retención es controlado por el volumen y área superficial de la laguna, mientras que la altura depende principalmente del canal (pendiente, nivel aguas abajo) y la forma de la entrada del flujo desde el canal a la laguna.

Para trabajar con la tasa de recarga con la que se realizó la simulación, se propone generar experiencias piloto en el que se aplique el resultado entregado por el modelo y se contraste con el caudal captado por el dren. Por ejemplo, se construye una laguna estándar, con un caudal de entrada aforado previamente, además con altura de aguas controlada, y se llega al resultado que propone el modelo, y al aumentar la altura de aguas se aumenta el valor del caudal captado. Es posible entonces, eventualmente llegar a una relación entre la altura de cargas, el caudal que entra a cada laguna y la tasa de infiltración, pudiéndose corregir los valores entregados por el modelo de acuerdo a dicha relación.

Cabe mencionar que la conductancia del dren adoptada limita el rango de validez de las simulaciones hasta un valor 1300 l/s captados por el dren.

A continuación se presentan los distintos puntos del trabajo que quedan abiertos a análisis más profundo, es decir, que se podrían abordar en trabajos de investigación futuros.

Sobre condiciones de borde

La importancia de los valores adoptados para las condiciones del borde del modelo hidrogeológico obliga a definir el respaldo ideal con el que se debe contar para cada tipo de dato, por ejemplo, para definir la conductividad hidráulica del terreno lo ideal sería contar con la construcción de sondajes junto con la realización de pruebas de bombeo en ellos. A continuación se presente una breve discusión para cada propiedad y tipo de condición de borde que se introdujo en el modelo:

- Propiedades hidrogeológicas del suelo (conductividad, almacenamiento, porosidad): para la conductividad y el almacenamiento, la situación ideal es contar con datos de pruebas de bombeo realizadas en sondajes distribuidos en el recinto. Para la porosidad, el análisis del suelo muestreado en la construcción de los mismos sondajes es una fuente de información válida. En el marco del presente trabajo no se realizaron sondajes,

por lo que se recurre a otros estudios para definir las propiedades del suelo. Ahora bien, se debe tomar en cuenta que los valores adoptados para la conductividad hidráulica y el almacenamiento son usualmente modificados en la fase de calibración del modelo, por lo que hay casos en los que una gran exactitud del dato inicial es menos relevante, además de que hay veces que el muestreo en terreno no es tan extenso como sería conveniente por lo que siempre hay que tener un punto de comparación al valor que entrega, que en este caso serían los datos de funcionamiento del sistema usados para calibrar.

- Nivel inicial de la napa: más bien condición inicial que de borde, se define como el nivel de la napa sin funcionamiento del dren. Lo ideal es contar con un par de pozos de observación, ubicados en el recinto de forma de cubrir la mayor extensión posible. Los datos de dichos pozos de observación deben servir para describir como varía el nivel de la napa con las condiciones de operación del sistema de infiltración. En el presente estudio se estima el nivel inicial de la napa a partir de estudios realizados sobre la zona, los que presentan un consenso de que dicho nivel está a pocos metros bajo la superficie (entre 5 y 10 metros). Ahora bien, en el proceso de construcción del modelo, una vez se adoptó el valor mencionado, se estudió el efecto – sobre el caudal captado por el dren – que tiene variar el nivel inicial de la napa, llegándose a la conclusión de que en un rango de 10 metros de variación no se aprecia un efecto relevante. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede afirmar que el valor adoptado cae dentro de lo aceptable y que al menos no es un factor ante el cual el dren sea sensible.
- Flujo subterráneo regional: el aforo del caudal pasante por el límite de aguas arriba del modelo, requiere combinar la realización de pruebas de bombeo en sondajes para determinar la conductividad del terreno, y un posterior monitoreo con pozos de observación, de forma de relacionar el caudal pasante en la sección con la pendiente de la napa subterránea. En el presente estudio, el valor de caudal entrante al sistema se estimó a partir de modelos hidrogeológicos, balances hidráulicos y reportes históricos de la DGA sobre el acuífero. Ahora bien, siendo el caudal entrante a la zona de estudio, quizás el factor más relevante sobre el caudal captado por el dren (superado sólo por la conductancia de éste), es deseable que el valor considerado sea lo más representativo posible de la situación real. Además, cabe mencionar que el modelo construido considera un caudal subterráneo de entrada constante para todo el período de simulación, situación que podría ser mejorada al tenerse un sistema de monitoreo funcionando. Considerando que se tiene un valor basado en más de una fuente, todas con buena confiabilidad, se concluye que éste factor en particular no resta validez al modelo propuesto.
- Río Aconcaagua: en el caso de este dato, se cuenta con información de buena confiabilidad ya que se tienen datos de caudal en la estación fluviométrica Aconcaagua en Romeral. Ahora bien, cabe señalar que en el modelo se introdujo como caudal del río el valor del caudal medio anual, siendo constante para todo el período de simulación. Se estima que dicha simplificación no afecta la validez del modelo, dado que el caudal del río no influye mucho sobre el caudal captado por el dren, y por otro lado, incluso

beneficia la validez del modelo al considerar que eliminar la variabilidad del río permite una mejor correlación entre el comportamiento del dren Las Vegas y la recarga artificial.

- Dren Las Vegas: Para la definición de la ubicación y características del dren, se recurre al proyecto de su construcción, el que aporta memorias de cálculo y planos. Ahora bien, dicho proyecto no aporta directamente la característica fundamental necesaria para describir el dren en el modelo construido: la conductancia, es decir, la capacidad de las paredes del dren de dejar pasar agua al interior de éste, propiedad que depende del material utilizado, del método constructivo y la posible colmatación de las entradas. Considerando la cantidad de variables a tomar en cuenta, y la dificultad de estudiar detalladamente en terreno las condiciones de funcionamiento de la estructura del dren, se decide calibrar la conductancia del dren de forma que el modelo simule las condiciones reales del terreno (ver capítulo 4). Dicha calibración se estima cercana a las condiciones de terreno.

En síntesis, la forma más evidente de mejorar el modelo construido sería agregar más detalle a la simulación al generar un registro que entregue mínimo un valor mensual para cada una de las variables relevantes, es decir, el caudal captado por el dren, el caudal subterráneo entrante desde aguas arriba y la cantidad de agua recargada superficialmente.

Sobre la calidad

Un factor que no fue analizado en detalle en el presente trabajo, pero que puede llegar a ser relevante, es la calidad del agua. Dependiendo de los valores de calidad que se encuentren en el sistema estudiado, se pueden observar diversas consecuencias, siendo las principales un cambio de los niveles de calidad del agua subterránea (deteriorización o mejora) y la colmatación de las lagunas de infiltración.

Con respecto a la variación de la calidad del agua subterránea, cualquier análisis debe comenzar con un muestreo del agua subterránea, realizado con el objetivo de comparar sus niveles de calidad con los del agua superficial a infiltrar. En el caso de que el agua superficial tenga igual o mejor calidad que el agua subterránea, se puede proceder con la infiltración. Ahora bien, en el caso contrario, el siguiente paso consiste en estimar la capacidad de tratamiento del suelo, es decir, el impacto (usualmente positivo) de éste sobre la calidad del agua infiltrada al transitar desde la superficie hasta la zona saturada del acuífero.

La capacidad de tratamiento de un suelo es objeto constante de estudio en casos de remediación de acuíferos, especialmente cuando se quiere evaluar el uso de la técnica llamada Tratamiento Suelo-Acuífero, también conocida como SAT (Soil-Aquifer Treatment), la que consiste en utilizar el suelo como filtro al infiltrar agua extraída del mismo acuífero, previa remoción del contaminante objetivo de la remediación. Dicha capacidad está definida por características como la porosidad del acuífero, el diámetro medio de los granos y la humedad. Ahora bien, existen algunos casos en los que el tránsito por el acuífero afecta negativamente la calidad del agua infiltrada, circunstancia propiciada principalmente por la presencia de minerales y/o compuestos químicos en el acuífero.

Generalmente, el estudio de la capacidad de tratamiento de un suelo es un trabajo de laboratorio que requiere muestras del suelo y del agua a infiltrar. Ahora bien, dado que en laboratorio no se pueden representar fielmente ciertas condiciones que se dan en terreno (heterogeneidad y extensión, por ejemplo) también a veces se efectúan dichos estudios directamente en terreno, ejecutando experiencias piloto de infiltración y registrando los resultados relevantes.

Con respecto a la manera en que la calidad del agua influye en la colmatación de las lagunas, en la literatura consultada se observa un consenso que establece que los parámetros más influyentes son: sólidos suspendidos totales (mg/l), turbiedad (UNT) y carbón orgánico total (mg/l) para sistemas superficiales, sólidos disueltos totales (mg/l), carbón orgánico disuelto (mg/l) y pH para sistemas profundos.

En el caso del presente trabajo, el enfoque estuvo puesto en la cantidad de agua a infiltrar, por lo que el trabajo en terreno tuvo que ver con medición de tasas de infiltración y caudales captados. Ahora bien, el río Aconcagua en el sector de la PTAP Las Vegas (la DGA tiene la estación Aconcagua en Romeral en las cercanías) tiene características de calidad dentro de lo admisible, con la relevante excepción de la concentración de sólidos suspendidos totales, que aumenta considerablemente en meses de deshielo (Cade-Idepe, 2004). Al considerar la calidad del agua superficial mencionada, la recomendación es instalar un sistema de prefiltración (Pérez-Paricio, 1998), lo que en el caso actual se considera demasiado conservador, por lo que se propone adoptar un régimen de limpieza de las lagunas en el cual como mínimo se limpie cada laguna dos veces al año, una vez inmediatamente antes del verano, y la otra inmediatamente después, de forma de generar las condiciones para aprovechar la infraestructura la mayor parte del tiempo posible.

7. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- ATTIA & MOUSTAFA (1998). "The role of artificial recharge in integrated water management in Egypt" Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- BOSHER & SIMMS (1998). "Wastewater Aquifer Storage and Recovery (ASR) – Towards sustainable reuse in South Australia" Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- CADE-IDEPE (2004) "Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad - Cuenca del rio Aconcagua" Dirección General de Aguas. DICIEMBRE 2004
- CARSUCRE (2009) PROYECTO DE PROTECCION INTEGRAL DE AGUAS SUBTERRANEAS "PPIAS". PROYECTO MC-01-006-2009.
- Comisión Nacional de Riego (2007) "Diagnóstico de caudales en cuencas no controladas de recuperación, cuencas de Aconcagua y Maipo"
- DREHER & GUNATILAKA (1998) "Ground water management system in Vienna –An evaluation after three years of operation" Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- Freeze, R. A.y J. A. Cherry (1979).- Groundwater. Prentice-Hall, 604 pp.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A. E., GARCÍA M. (2004). La recarga artificial de acuíferos en el mundo. Estado de la cuestión y experiencias. Segunda parte: inventario de experiencias a nivel mundial. VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. Pag. 334-343.
- HAEFFNER, H., DETAY, M. & BERSILLON, J.L. (1998). Sustainable groundwater management using artificial recharge in Paris region." Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- HORST (1998) "The role of artificial recharge of groundwater for the water supply of Amsterdam" Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- LLURIA (1998) "Successful operation of a large aquifer storage facility for a desert community" Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- MIETTINEN, I., LEHTOLA, M., VARTIAINEN, T. & MARTIKAINEN, P. (2003). Microbial Regrowth in Artificially Recharged Groundwater: Experiences from a 4-Year Project." Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank

Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.

- MURILLO Y CO-AUTORES (2000) "Recarga artificial en el acuífero de Jávea mediante aprovechamiento de los excedentes hídricos procedentes del río Jalón-Gorgos (Alicante)" V Congreso Geológico de España. Universidad de Alicante.
- VALLEJOS (2001) "BASES DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO SUELO - ACUIFERO (SAT). APLICACION CASO COPIAPO." XIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL AIDIS – CHILE. Santiago, Octubre de 2001
- van GENUCHTEN, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society Americas Journal 44:892-898.
- VISWANATHAN & AL-SENAFY (1998). "Role of artificial recharge in the water resources management of Kuwait" Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- WHO (2003) "State of the Art Report Health Risks in Aquifer Recharge Using Reclaimed Water"
- WILMANS (2001) "RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN EL SECTOR ALTO DE LA CUENCA DEL RÍO MAPOCHO" División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile, Casilla 228-3, Santiago, Chile.

