



CURSO DE MODELACION NUMÉRICA DE AGUAS SUBTERRANEAS

MODELACION NUMERICA ACUIFERO ZONA NORTE DE SANTIAGO

20 a 22 de Septiembre de 2006
Santiago - Chile

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ZONA DE ESTUDIO Y MODELO CONCEPTUAL	3
2.1	ANTECEDENTES GENERALES	3
2.1.1	Ubicación	3
2.1.2	Clima y Vegetación	4
2.1.3	Suelos	5
2.1.4	Población y Superficie	6
2.2	HIDROLOGÍA	9
2.2.1	Pluviometría	9
2.2.2	Fluviometría y Drenaje	11
2.3	HIDROGEOLOGÍA	11
2.3.1	Geología General	11
2.3.2	Basamento Rocoso	13
2.3.3	Formaciones Acuíferas	14
2.3.4	Propiedades Hidrogeológicas	17
2.3.5	Distribución de Nivel Estático	18
2.3.6	Modelo Conceptual de Flujos	22
2.4	BALANCE HÍDRICO	23
2.4.1	Antecedentes Generales	23
2.4.2	Recargas	24
2.4.2.1	Infiltración de Fuentes Longitudinales	24
2.4.2.2	Pérdidas Red de Agua Potable y Alcantarillado	26
2.4.2.3	Regadío Predial	26
2.4.2.4	Precipitación	27
2.4.2.5	Escorrentía de Areas Aledañas	28
2.4.2.6	Flujo Subterráneo	28
2.4.3	Descargas	28
2.4.3.1	Aguas Andinas (ex EMOS)	28
2.4.3.2	Pozos Particulares	29
2.4.3.3	Flujo Subterráneo	29
2.4.4	Resumen Balance Hídrico AZNS	29
3.	MODELACIÓN NUMÉRICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	32
3.1	ASPECTOS GENERALES	32
3.2	DESCRIPCIÓN DE VISUAL MODFLOW	32
3.3	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	33
3.3.1	Discretización de la malla	33
3.3.1.1	Discretización espacial horizontal	33
3.3.1.2	Discretización espacial vertical	33
3.3.1.3	Discretización temporal	33
3.3.2	Período de simulación	35
3.3.3	Parámetros hidrogeológicos	35
3.3.4	Recargas y descargas	38
3.3.4.1	Recargas	38
3.3.4.2	Descargas	39
3.3.4.3	Condición de borde	39
3.4	CALIBRACIÓN	40
3.4.1	Aspectos generales	40
3.4.2	Régimen permanente	40
3.4.2.1	Período de calibración	41
3.4.2.2	Propiedades	41
3.4.2.3	Recarga	41
3.4.2.4	Descargas	42
3.4.2.5	Condición de borde e inicial	44
3.4.2.6	Pozos de observación	44
3.4.2.7	Parámetros finales	44
3.4.2.8	Ajuste de niveles	46

3.4.3	<i>Régimen Transiente</i>	47
3.4.3.1	Período de calibración.....	47
3.4.3.2	Propiedades	47
3.4.3.3	Recargas	48
3.4.3.4	Descargas	48
3.4.3.5	Condición de borde e inicial	49
3.4.3.6	Pozos de observación.....	49
3.4.3.7	Parámetros Finales	50
3.4.3.8	Ajuste Niveles	50
3.4.4	<i>Equipotenciales</i>	52
3.4.5	<i>Flujos</i>	54
3.4.6	<i>Balance</i>	54
3.5	VALIDACIÓN.....	58
3.6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	63
4.	APLICACIÓN DEL MODELO	67
4.1	GENERALIDADES	67
4.2	GENERACIÓN DE ESTADÍSTICA.....	67
4.3	SIMULACIÓN DE ESCENARIOS.....	68
4.3.1	<i>Simulación Base</i>	68
4.3.2	<i>Simulación A: eliminación infiltración canal El Carmen</i>	68
4.3.3	<i>Simulación B: cambio uso de suelo</i>	68
4.3.4	<i>Simulación C: incremento demanda agua subterránea</i>	69
4.4	POZOS DE CONTROL.....	71
4.5	RESULTADOS.....	72
4.5.1	<i>Niveles piezométricos en el AZNS</i>	72
4.5.2	<i>Control de flujos</i>	80
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
	BIBLIOGRAFÍA.....	85

1. INTRODUCCIÓN

Las políticas de explotación de las aguas subterráneas como complemento de los recursos hídricos superficiales están frecuentemente basadas en planificaciones de corto plazo y pueden no ser sostenibles en el tiempo. El manejo sostenible de las aguas subterráneas tiene como objetivo usar el agua del subsuelo de tal manera que se alcance un estado de equilibrio, tanto en cantidad como en calidad, gobernado por la tasa de renovación, por las tasas de extracción, por la dinámica del acuífero y por los impactos potenciales de contaminantes antropogénicos o naturales. Con el fin de preservar estos recursos para futuras generaciones se requiere de una adecuada gestión de los recursos hídricos, apoyada en el conocimiento de los sistemas y en la predicción de efectos derivados de futuros cambios en ellos, mediante la posible integración de modelos superficiales con modelos subterráneos.

En este contexto fue desarrollado el proyecto regional RLA/8/031 “*Manejo Integrado y Sostenible de los Recursos Hídricos Subterráneos en América Latina*” apoyado por el *Organismo Internacional de Energía Atómica*. Este proyecto se inició en el año 2001 e incluyó los siguientes países; Ecuador, Colombia, Uruguay, Costa Rica, Perú y Chile. Para el proyecto cada país seleccionó un acuífero como caso de estudio. En Chile se eligió el acuífero de la zona norte de Santiago (AZNS) debido a su alta demanda para el uso potable e industrial. Las instituciones involucradas en este proyecto son la Dirección General de Aguas (DGA), la Universidad de Chile, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Aguas Andinas (AA), la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

En la Región Metropolitana, el uso del agua subterránea ha estado ligado principalmente al abastecimiento de agua potable urbano y rural, al uso industrial y al riego en algunas zonas periféricas del gran Santiago. Sin embargo, debido al virtual agotamiento de los recursos hídricos superficiales de la región, se prevé un continuo incremento de la explotación de agua subterránea para fines potables y también industriales. Aguas Andinas (ex Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias) estima que deberá incrementar su oferta de agua subterránea en cerca de un 30% para el año 2020.

En el área de estudio propuesta coexisten dos acuíferos uno libre y otro confinado; dicha zona presenta múltiples usos tales como industrial, habitacional, cementerios, vertederos y en menor grado agrícola. El desarrollo de estas actividades ejerce una presión significativa por el uso de los recursos subterráneos. Debe señalarse que se han detectado problemas en la calidad de las aguas subterráneas del sector, especialmente en lo que se refiere a contaminación por nitratos.

En resumen, como puede apreciarse la zona propuesta presenta complejidad para la gestión del recurso subterráneo, lo que la hace un área interesante para la implementación de un modelo de flujos que permita la simulación de escenarios que en el futuro pudiese enfrentar el acuífero en estudio.

Este estudio se divide en seis capítulos incluyendo la introducción. El Capítulo 2 describe la zona de estudio, presentando los antecedentes hidrológicos, hidrogeológicos y demográficos. Asimismo, en el Capítulo 2 se desarrolla el balance hídrico, cuantificando las recargas y descargas a las que está afecto el sistema, separando la zona de estudio en zonas urbanas y no urbanas para cuantificar la infiltración que proviene de la precipitación, regadío, de la infiltración del Canal el Carmen y de la pérdida de las redes de agua potable y alcantarillado.

El Capítulo 3 tiene relación con la implementación del modelo de simulación a partir de la información recopilada en el Capítulo 2. Aquí se contrasta el modelo con los niveles observados en terreno (calibración) y se modifica la distribución y los valores de los parámetros

hidrogeológicos para obtener un satisfactorio ajuste de niveles. Por último se extiende el período de simulación para validar la calibración y así poder utilizar el modelo para simular escenarios futuros.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados de tres escenarios que podrían afectar al acuífero. Los escenarios son la impermeabilización del canal El Carmen, la urbanización de los sectores todavía no urbanizados de la comuna de Huechuraba y el aumento de bombeo para suplir la demanda de agua potable producto del aumento de habitantes.

Por último, en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones finales y las recomendaciones derivados del presente estudio.

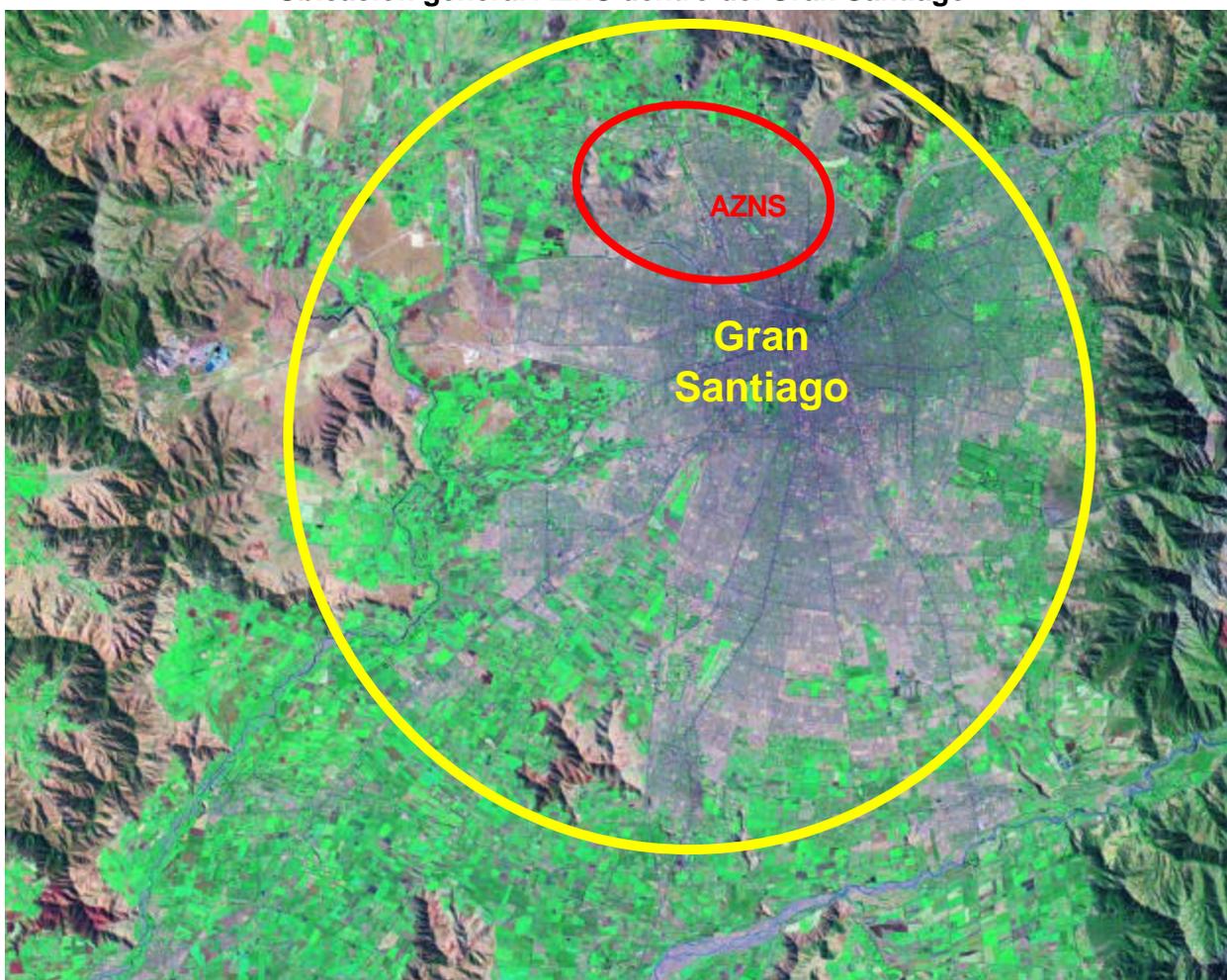
2. ZONA DE ESTUDIO Y MODELO CONCEPTUAL

2.1 Antecedentes Generales

2.1.1 Ubicación

La zona de estudio se sitúa al norte del río Mapocho, en la ciudad de Santiago, región Metropolitana, tal como se muestra en la Figura 2.1. Comprende las comunas de Independencia, Recoleta, Conchalí, Huechuraba y parte de la comuna de Renca. Las principales vías de acceso la constituyen la carretera Panamericana Ruta 5; que une al país de norte a sur; la Ruta Internacional 57; que une Santiago con Mendoza; y la circunvalación Av. Américo Vespucio, que circunda toda la ciudad de Santiago.

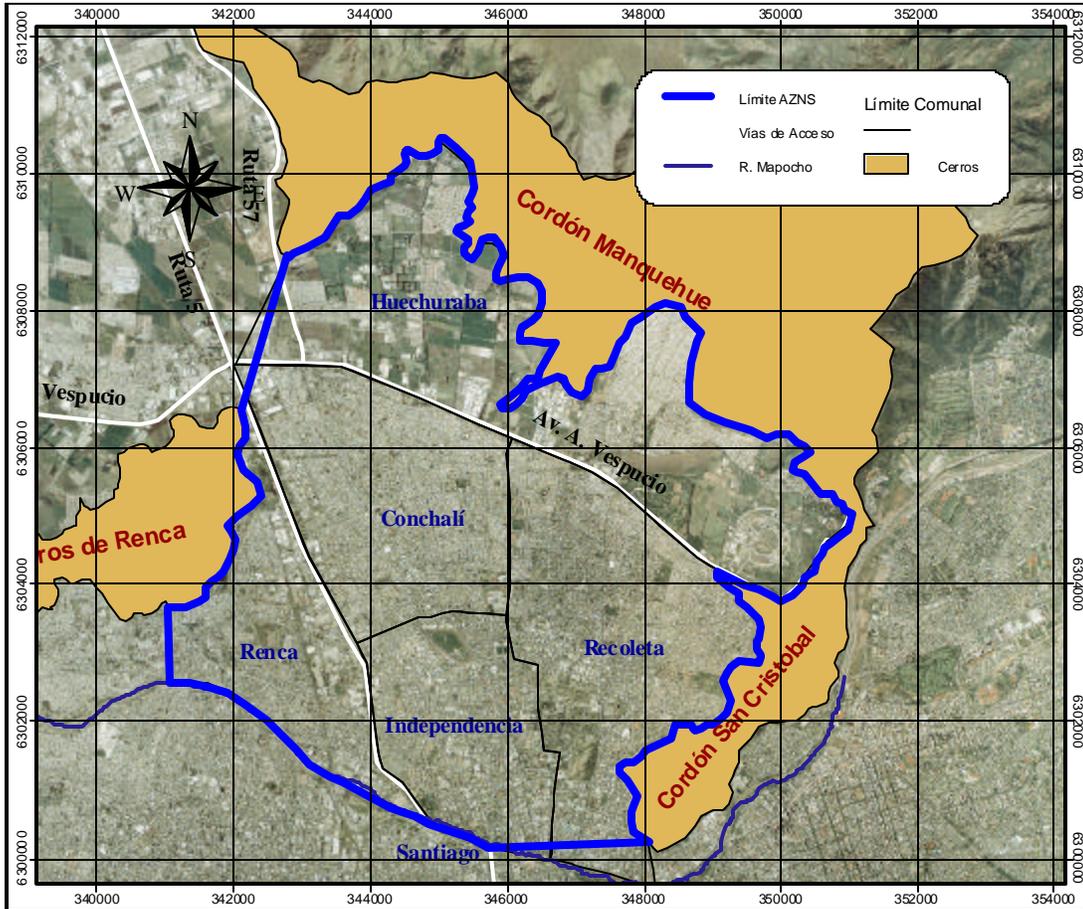
Figura 2.1
Ubicación general AZNS dentro del Gran Santiago



Fuente: elaboración propia.

El acuífero se ubica específicamente entre las coordenadas UTM del Datum Sudamericano de 1956, N: 6.299.000 – 6.311.000 y E: 341.000 – 351.000, extendiéndose en la dirección norte-sur entre el río Mapocho y el cordón Huechuraba, y entre los cerros de Renca y el cordón San Cristóbal en el eje este-oeste. El detalle de la zona de estudio se aprecia en la Figura 2.2.

Figura 2.2
Detalle zona de estudio



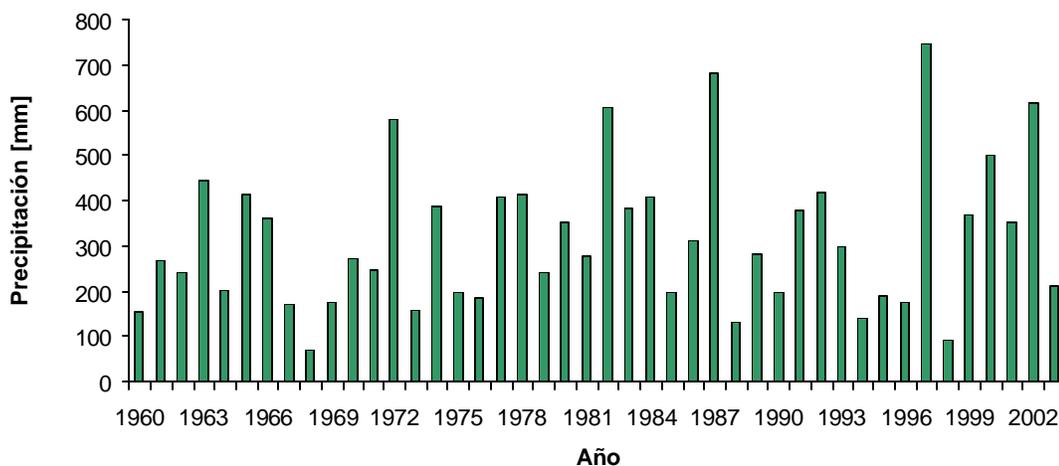
Fuente: elaboración propia.

2.1.2 Clima y Vegetación

El clima que predomina en la ciudad de Santiago corresponde al templado cálido con prolongada estación seca (7 a 8 meses), concentrándose las precipitaciones en los meses de invierno. La temperatura media anual es de 18.4°C, que resulta del promedio de las temperaturas medias invernal de 14.7°C y estival de 22.1°C. La humedad relativa promedio es del 68.3% (Comisión Nacional de Riego). La precipitación media anual en Santiago es de 317 mm (estación pluviométrica Santiago terraza DGA) siendo muy irregular en su distribución a lo largo del año, atrasándose, adelantándose o concentrándose en un período muy corto. También presenta una gran variabilidad de año en año pudiendo ser un año muy lluvioso y el siguiente muy seco. Hacia la cordillera de los Andes el clima se torna más riguroso, aumentando las precipitaciones y decreciendo las temperaturas. En la Figura 2.3 se observa la variabilidad antes mencionada.

La vegetación la constituyen arbustos principalmente de color verde oscuro con aspecto de matorral. En el cordón del San Cristóbal y de Huechuraba se presentan bosques densos, donde predominan arbustos nativos que presentan mayor resistencias a períodos secos prolongados, como el espino, tebo, crucero, guayacán y traiguén. En las zonas no urbanas de bajas pendientes se presentan praderas con hierbas y arbustos, principalmente espinos, que son aprovechados para el pastoreo.

Figura 2.3
Variabilidad Anual de la Precipitación en el AZNS



Fuente: DGA

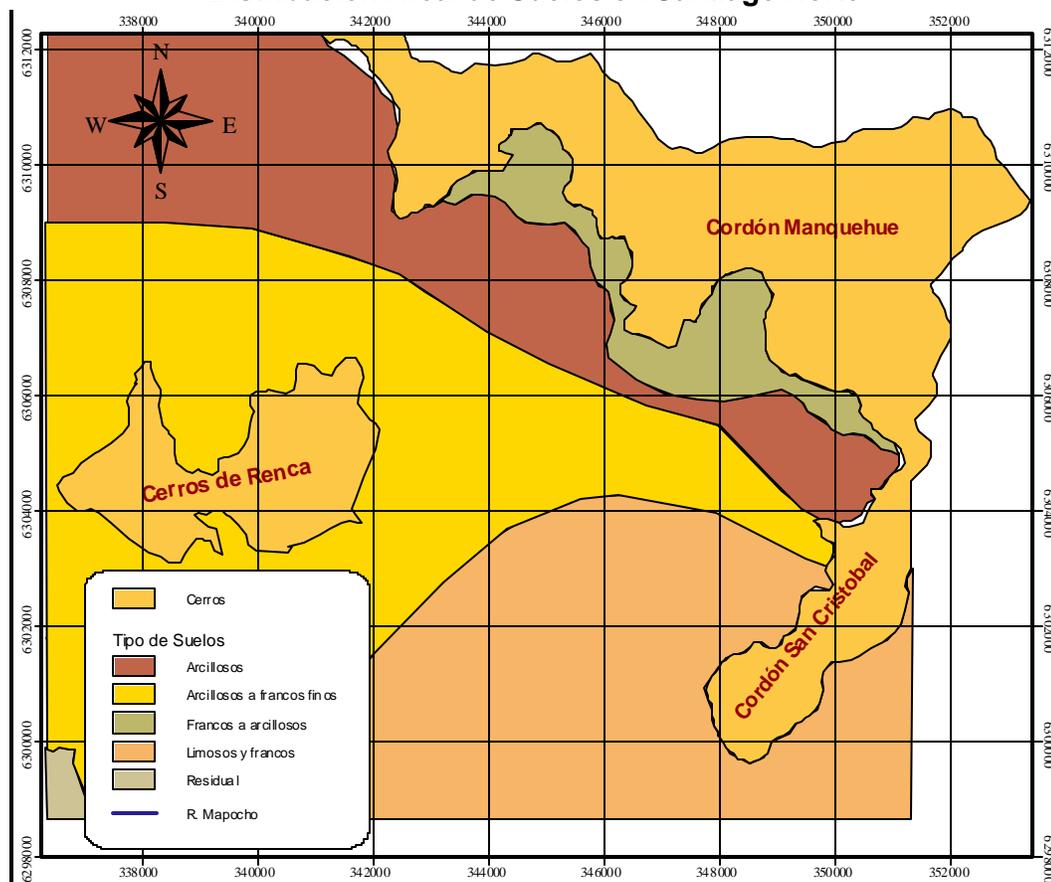
2.1.3 Suelos

Se entiende por suelos como la primera capa de aproximadamente 0.5 m de material no consolidado situado inmediatamente por debajo de la superficie y que sirve como medio natural para el desarrollo de la vegetación. La magnitud de la infiltración y escorrentía producto de las precipitaciones está directamente relacionada con las características del suelo, por lo que se ha querido incluir en el presente estudio la clasificación de suelos realizado por Fernández (2001) según el criterio taxonómico, que se basa en las características intrínsecas según el triángulo textural del Soil Survey Staff (1967). En la Figura 2.4 se aprecia la distribución areal de los suelos según Fernández.

De acuerdo a la clasificación de suelos realizadas por Fernández (2001) en la zona de estudio se pudo distinguir los siguientes aspectos:

- En la zona que rodea al cerro San Cristóbal, y hasta Quinta Normal, se tienen suelos de tipo limosos y francos, de color pardo oscuro, con alto contenido de materia orgánica; su espesor promedio es menor a 1.5 m.
- Los suelos que se encuentran rodeando a los cerros de Renca hasta llegar por el norte a Américo Vespucio aproximadamente, son de tipo francos finos a arcillosos, de espesor indeterminado, caracterizándose por la presencia de arcillas expansivas.
- Suelos arcillosos se observan al oriente de la zona de estudio, los que son ricos en arcillas expansivas, de alta salinidad, y desarrollo de grietas de desecación. Su espesor es indeterminado.
- Los escombros de falda y ápice de conos de deyección muestran suelos superficiales arenosos, de color pardo amarillento, los cuales son de origen transportado, presentándose poco desarrollados. Su espesor máximo es de 0.5 m.
- Hacia la zona distal de los conos, y cayendo hacia el valle en Huechuraba, los suelos son francos a arcillosos, con espesores entre 0.2 y 0.4 m.

Figura 2.4
Distribución Areal de Suelos en Santiago Norte



Fuente: Fernández (2001)

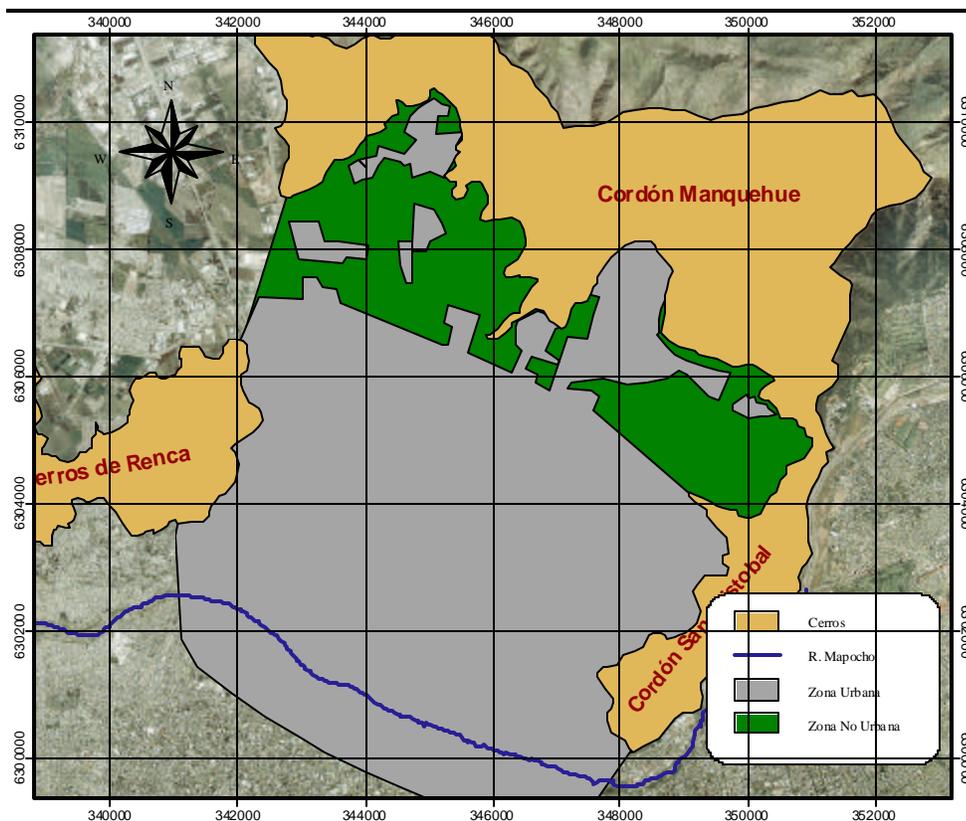
2.1.4 Población y Superficie

La extensión de la zona de estudio abarca 59.6 Km², de los cuales 13.5 Km².(23%) corresponden a áreas no urbanizadas de la comuna de Huechuraba, donde los suelos no urbanizados se utilizan para el cultivo de hortalizas, como praderas de pastoreo o simplemente corresponden a sitios eriazos. Los restantes 46.1 Km² (77%) lo constituyen las superficies urbanas de las comunas de Huechuraba, Conchalí, Independencia, Recoleta y parte de Renca, tal como se indica en la Figura 2.5. En la Tabla 2.1 se indican las superficies de las comunas involucradas en el AZNS.

Tabla 2.1
Distribución Comunal de Superficie en el AZNS

Comuna	Superficie [Km ²]	Superficie en AZNS [Km ²]	% Superficie en AZNS
Huechuraba	19.8	19.8	100.0%
Conchalí	11.0	11.0	100.0%
Independencia	7.4	7.4	100.0%
Recoleta	13.6	13.6	100.0%
Renca	23.9	7.9	33.1%
Total	75.6	59.6	-

Figura 2.5
Distribución de Zonas Urbana y no Urbana



Fuente: fotografías aéreas, Ciren- CORFO.

El número de habitantes ha variado levemente de 500.000 a 505.000 de 1990 a 2003 (INE), tal como se indica en la Tabla 2.2. Se prevé un fuerte aumento poblacional en los próximos años, debido a las crecientes urbanizaciones en la comuna de Huechuraba.

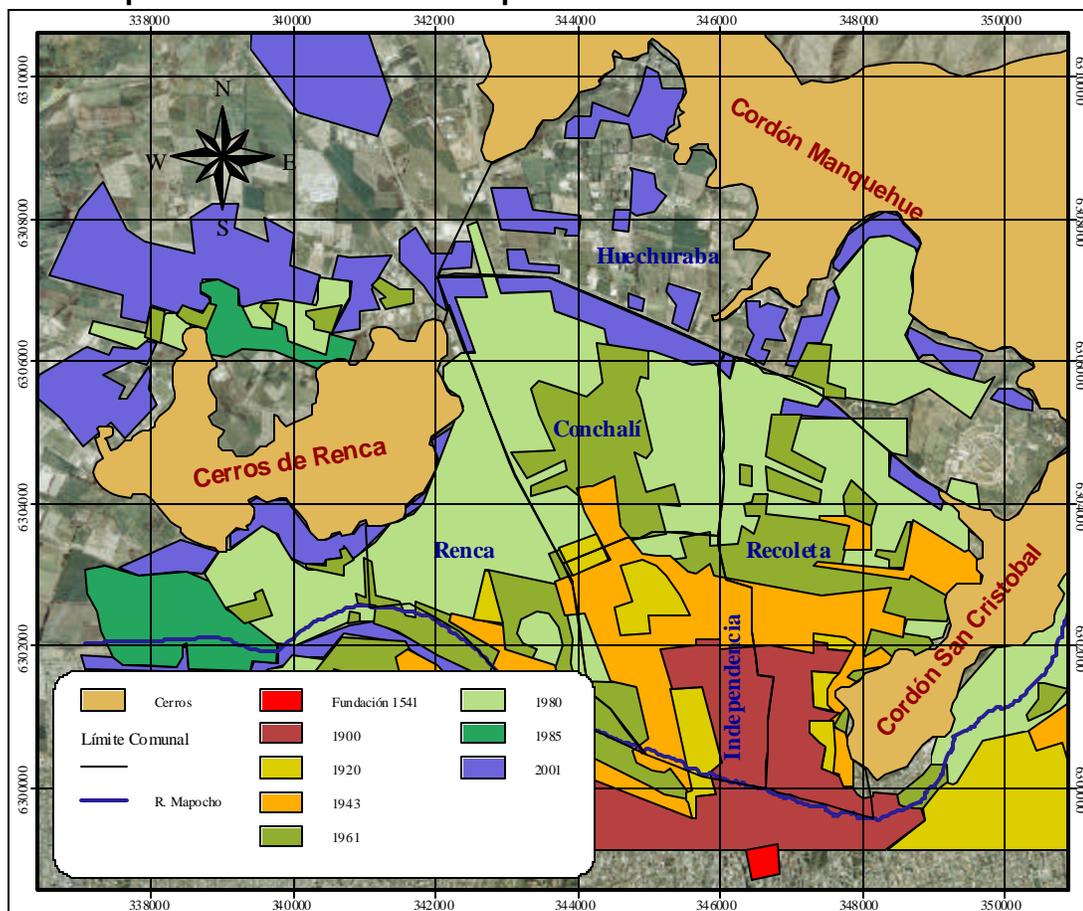
Tal como se muestra en la Figura 2.6, la zona de estudio, antes de 1900 sólo se había poblado el sur de la actual comuna de Recoleta y el sur oriente de Independencia. Hasta 1920 la expansión urbana no fue notoria, expandiéndose tan sólo a los alrededores de las superficies pobladas hasta fines del siglo XIX. Recién a partir de 1920 comienza una sostenida expansión urbana, poblando por completo la zona al sur de la circunvalación Av. Américo Vespucio y el sector Pincoya de la comuna de Huechuraba, en 1980. Hacia 1985 se pueblan los sectores aledaños a los cerros de Renca y la comuna de Huechuraba, principalmente en las cercanías de la Av. Américo Vespucio y el sector cordillerano de la Av. Pedro Fontova.

Tabla 2.2
Número de Habitantes AZNS 1990-2003

Año	Comuna					Total
	Huechuraba	Conchalí	Independencia	Recoleta	Renca*	
1990	60,755	153,808	80,738	164,680	41,024	501,005
1991	61,467	153,358	79,734	164,777	42,201	501,537
1992	62,191	152,907	78,707	164,880	43,403	502,088
1993	62,922	152,439	77,674	164,981	44,611	502,627
1994	63,640	151,996	76,660	165,084	45,803	503,183
1995	64,338	151,556	75,674	165,179	46,956	503,703
1996	64,705	151,092	74,830	165,288	48,045	503,960
1997	65,068	150,615	73,999	165,372	49,115	504,169
1998	65,420	150,166	73,192	165,476	50,156	504,410
1999	65,768	149,726	72,396	165,579	51,181	504,650
2000	66,106	149,302	71,618	165,681	52,190	504,897
2001	66,725	148,744	70,831	165,560	53,036	504,896
2002	67,328	148,199	70,054	165,440	53,866	504,887
2003	67,928	147,653	69,294	165,321	54,683	504,879

Se considera una distribución homogénea de la población, por lo que la población de Renca en el AZNS se considera como un 33.1% del total (ver Tabla 2.1).

Figura 2.6
Expansión del Area Urbana a partir de la Fundación en 1541 a 2001



Fuente: 1) XII Asamblea General IPGH., Santiago, 1986.
2) Fotografías aéreas, Ciren – CORFO.

2.2 Hidrología

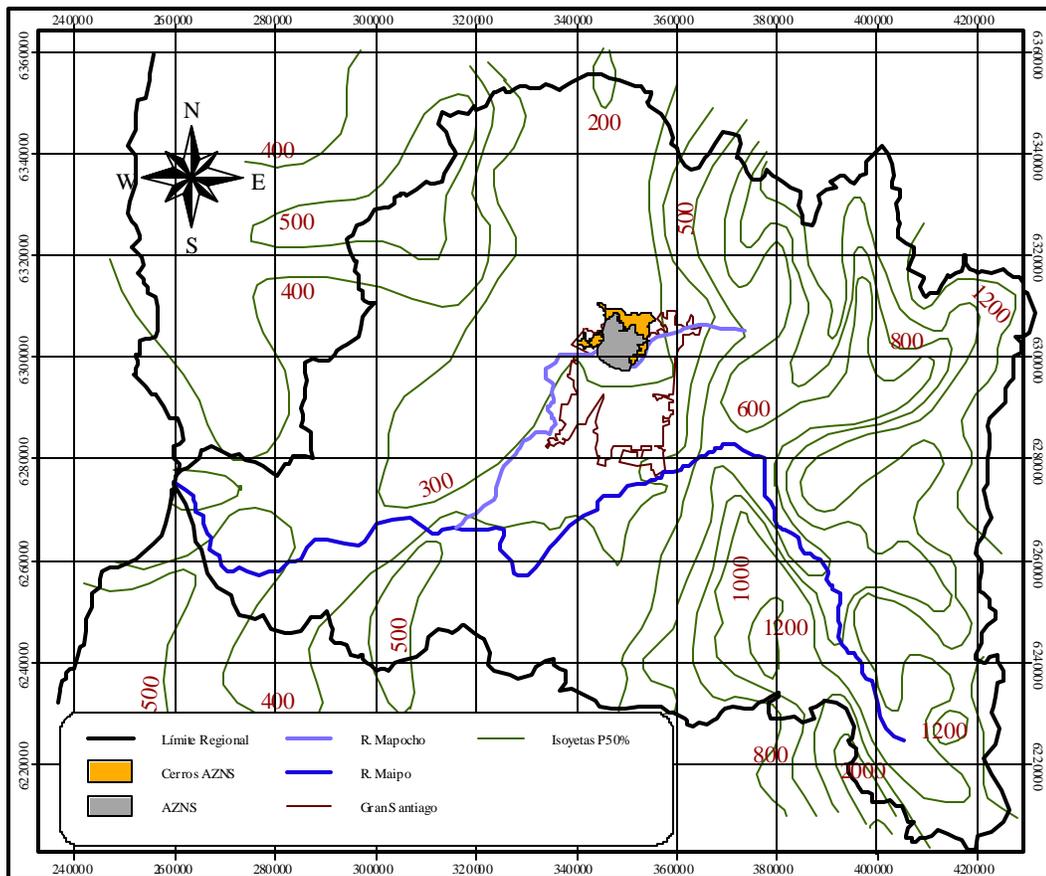
2.2.1 Pluviometría

Dado que la precipitación constituye una de las principales fuentes de recarga del acuífero, el análisis de las estadísticas de precipitación cobra importancia para la estimación de los aportes al sistema subterráneo.

En la Figura 2.7 se observa la distribución de las precipitaciones de la Región Metropolitana en un mapa de isoyetas construido a partir de estadísticas anuales de 36 estaciones consideradas en el estudio AC (2000). Estas fueron elegidas basándose en la extensión, calidad de las estadísticas y en su buena distribución.

El mapa de isoyetas evidencia la relación de la precipitación con la topografía, aumentando las precipitaciones a medida que se aproximan a la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Los Andes. En el interior del la cuenca, en la zona de Santiago, precipitan del orden de 320 mm/año. Al acercarse a las zonas de mayor altura, en la Cordillera de la Costa, las precipitaciones aumentan a 400-500 mm/año. Hacia la Cordillera de Los Andes, se alcanzan valores de 1000 mm/año en Farellones, y hasta 2000 mm/año en las cumbres más altas de la cuenca del río Maipo.

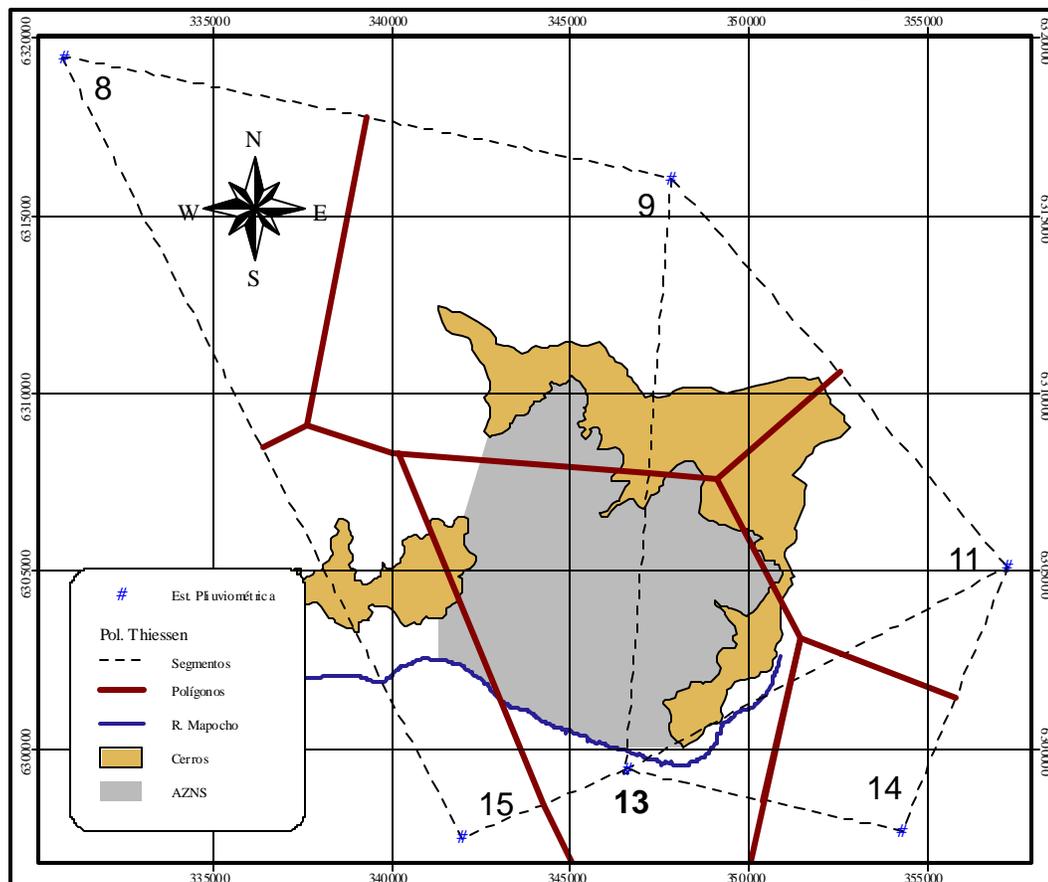
Figura 2.7
Mapa de Isoyetas Anuales para una Probabilidad de Excedencia del 50%



Fuente: AC(2000)

Dado que para el presente estudio se desea caracterizar la precipitación sobre el acuífero de la zona norte de Santiago (AZNS), se hace uso del método de los polígonos de Thiessen a partir de las 6 estaciones más cercanas (Figura 2.8), para así determinar cuáles de éstas ejercen influencia sobre el acuífero.

Figura 2.8
Área de Influencia de Estaciones Pluviométricas, a partir de Polígonos de Thiessen



Fuente: elaboración propia.

Como resultado de la proyección de los polígonos de Thiessen, la estación N°13; Santiago edificio MOP; es la de mayor influencia sobre la zona de estudio. Si bien las áreas de los polígonos de las estaciones N°9, Fundo Huinganal y N°15, Quinta Normal, también caen sobre el AZNS, sus influencias se desprecian por los siguientes motivos:

- La estación N°9 se encuentra a sotavento del cordón Huechuraba, por lo cual sus estadísticas no son representativas de las precipitaciones a barlovento, donde se encuentra la zona de estudio.
- Las estaciones N°15 abarca menos del 5% de la superficie del AZNS y se encuentra cercana a la N°13, registrando prácticamente las mismas estadísticas que la estación Santiago, Edificio MOP.

Por lo anterior y dado que se cuenta con estadística completa de precipitación diaria desde el año 1961 a la fecha en la estación Santiago Edificio MOP, el presente estudio utilizó las estadísticas de esta estación pluviométrica para caracterizar las recargas al sistema acuífero.

2.2.2 Fluviometría y Drenaje

El principal cauce que drena la zona de estudio es el río Mapocho, que nace en la confluencia de los ríos Molina, San Francisco y el estero Arrayán en la cordillera de Los Andes. Desembocando al río Maipo frente a El Monte en la misma Región Metropolitana. El río se encuentra revestido entre el canal San Carlos y el puente Manuel Rodríguez, por donde cruza la carretera Panamericana. Hacia aguas abajo el río escurre en su cauce natural, cambiando de dirección hacia el noroeste debido a la barrera natural que le impone el cerro Lo Aguirre. En su trayecto el río presenta numerosas extracciones utilizadas para riego. En la zona de estudio, las extracciones lo constituyen los canales El Carmen, La Pólvara y La Punta. Además existen canales de drenaje, los principales son el canal Huechuraba y el canal Los Choros.

El canal El Carmen es el de mayor interés para la modelación del AZNS, dado que rodea a la zona de estudio por el nororiente sin estar revestido, aportando un caudal considerable de infiltración. El Carmen nace al final del canal San Carlos, conduciendo las aguas provenientes del río Maipo a través de un sifón bajo el río Mapocho y por un túnel a través del cerro San Cristóbal. El canal riega 6.842 há. del sector norponiente de la Región Metropolitana.

El canal La Punta toma parte de las aguas descargadas por el canal San Carlos mediante un sistema de compuertas en el puente Manuel Rodríguez, en la comuna de Santiago. Se encuentra revestido en toda su trayectoria por la zona de estudio, conduciendo las aguas al sector norponiente de la capital para regar 4.409 há.

Al igual que el canal La Punta, el canal La Pólvara toma las aguas descargadas por el canal San Carlos al Mapocho, por medio de un “taco” ubicado en la comuna de Providencia. También se encuentra revestido en toda su trayectoria por la zona de estudio. Casi la totalidad de las aguas de este canal se utilizan para el regadío en el Hipódromo Chile y del Cementerio General, abarcando tan sólo 26 há.

En la zona sólo se cuenta con dos estaciones fluviométricas de interés, río Mapocho en Los Almendros y en Rinconada de Maipú. Éstas cuentan con estadísticas rellanadas y corregidas para el período 1950/51 – 1997/98, obtenida del estudio AC (2000). Para el canal El Carmen, sólo se cuenta con información diaria completa a partir del año 2001, y de caudales medios mensuales del año 1992, obtenidos del estudio AP (1993).

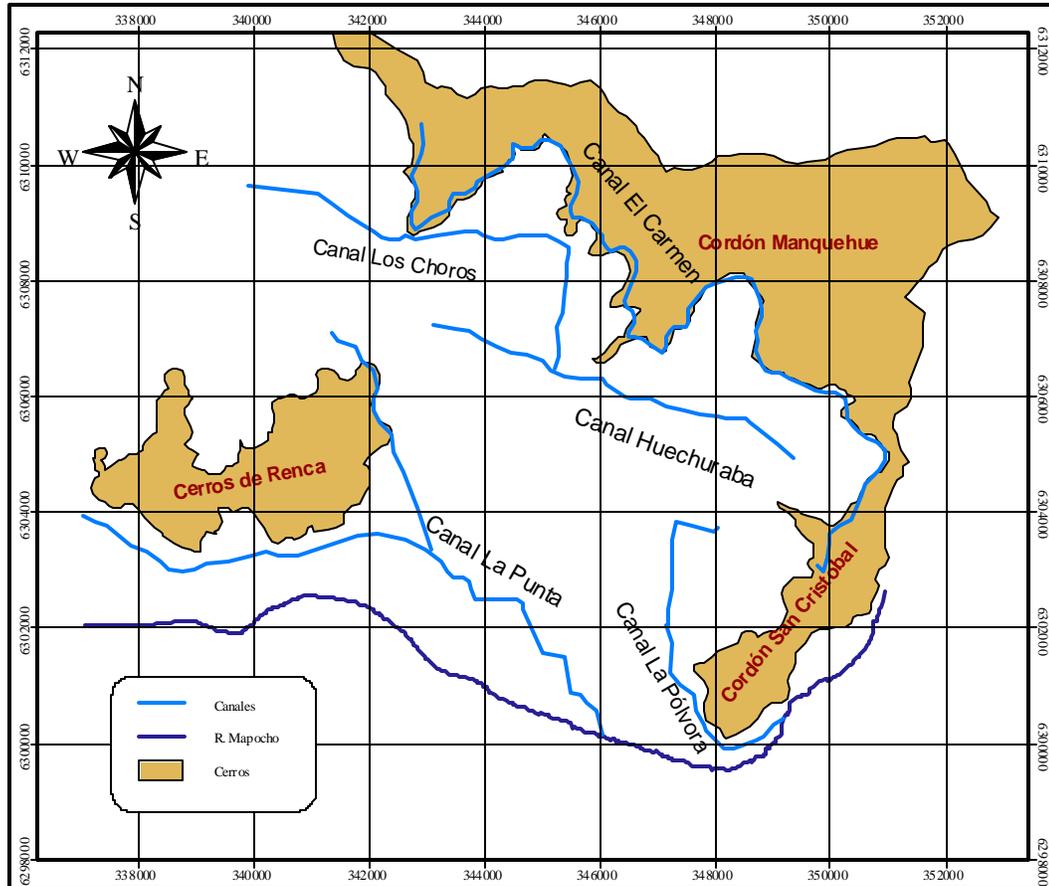
La Figura 2.9 muestra un diagrama esquemático con la ubicación del sistema de drenaje y canales de regadío de la zona de estudio.

2.3 Hidrogeología

2.3.1 Geología General

En la zona central de Chile se distinguen cuatro unidades morfoestructurales paralelas entre sí y de orientación norte sur. Al oriente se distingue la Cordillera de Los Andes, siguiendo hacia el poniente con la Depresión Intermedia, La Cordillera de la Costa y la Planicie Costera. Esta configuración se habría generado durante una fase de máxima compresión ocurrida durante el Oligoceno Superior-Plioceno Medio (Thiele, 1980).

Figura 2.9
Canales de Regadío y Drenaje



Fuente: elaboración propia.

La Cordillera de los Andes presenta los rasgos característicos de una montaña de relieve joven y se encuentra coronada por elevadas cumbres y por algunos volcanes activos e inactivos. En su gran mayoría, consta de rocas estratificadas mesozoicas, volcánicas, sedimentarias, marinas y continentales de gran espesor, formada desde el Jurásico Superior al Cuaternario. En ella aflora una secuencia de rocas volcánicas y volcanes detríticas continentales. En el estudio AC (2000) se han agrupado las rocas que afloran en el sector chileno en once unidades litoestratigráficas en orden decreciente de edad, las que se indican a continuación:

- Formación Río Colina (sedimentaria, marina y volcánica, 158 a 140 Ma)
- Formación Río Damas (sedimentaria, continental y volcánica, 140 a 135 Ma)
- Formación Río Valdés (sedimentaria, marina y volcánica, 135 a 114 Ma)
- Formación Coilimapu (sedimentaria, volcanoclástica continental y volcánica, 112 a 95Ma)
- Formación Abanico (volcánica y sedimentaria, continental, 63 a 23.5 Ma)
- Formación Farellones (volcánica y sedimentaria, continental del Mioceno, 23.5 a 5 Ma)
- Formación Colorado – La Parva (cuerpos volcánicos y subvolcánicos pliocénicos, 5 a 1.8 Ma)
- Unidad Volcánica antigua (volcanes extinguidos, pleistocénicos, 1.8 a 0.01 Ma)
- Unidad Volcánica nueva (volcanes activos, holocénicos, menor de 0.001 Ma)
- Depósitos morrénicos y depósitos fluvio-glaciales del Cuaternario, 1.8 a 0.001 Ma)

En oposición a la Cordillera de Los Andes, la Cordillera de La Costa está asociada a formaciones geológicas más antiguas, aflorando principalmente rocas intrusivas con edades

dentro del lapso que abarca desde el Paleozoico al Cretácico (300 a 90 Ma). En menor cantidad se reconocen rocas estratificadas cuyas edades van desde el Jurásico Medio al Terciario (178 a 5 Ma). Forma un abrupto frente oriental, que desciende en forma gradual hacia el mar. En el mismo estudio citado anteriormente, se han agrupado estos estratos en 9 unidades de rocas que van del más nuevo al más antiguo:

- Formación Cerro Calera (sedimentaria marina y transicional, 178 a 170 Ma)
- Formación Horqueta (volcánico continental 170 a 131 Ma)
- Formación Lo Prado (sedimentaria marina, 131 a 114 Ma)
- Estratos de Horcón de Piedra (volcánica, edad cretácica inferior, 131 a 95 Ma)
- Formación Veta Negra (volcánica y subvolcánica continental, 114 a 107 Ma)
- Formación Las Chilcas (sedimentaria y volcánica, 107 a 95 Ma)
- Formación Lo Valle (volcánico sedimentario continental de edad cretácica superior – terciaria inferior, 95 a 58 Ma)
- Formación Navidad (sedimentaria marina fosilífera, de edad miocena – pliocena 23.5 a 1.8 Ma)
- Estratos de Potrero Alto (sedimentario continental, de edad niocena – pliocena – pleistocena, 23.5 a 0.001 Ma)
- La unidad Ignimbrita de Pudahuel (se considera como parte del relleno sedimentario)

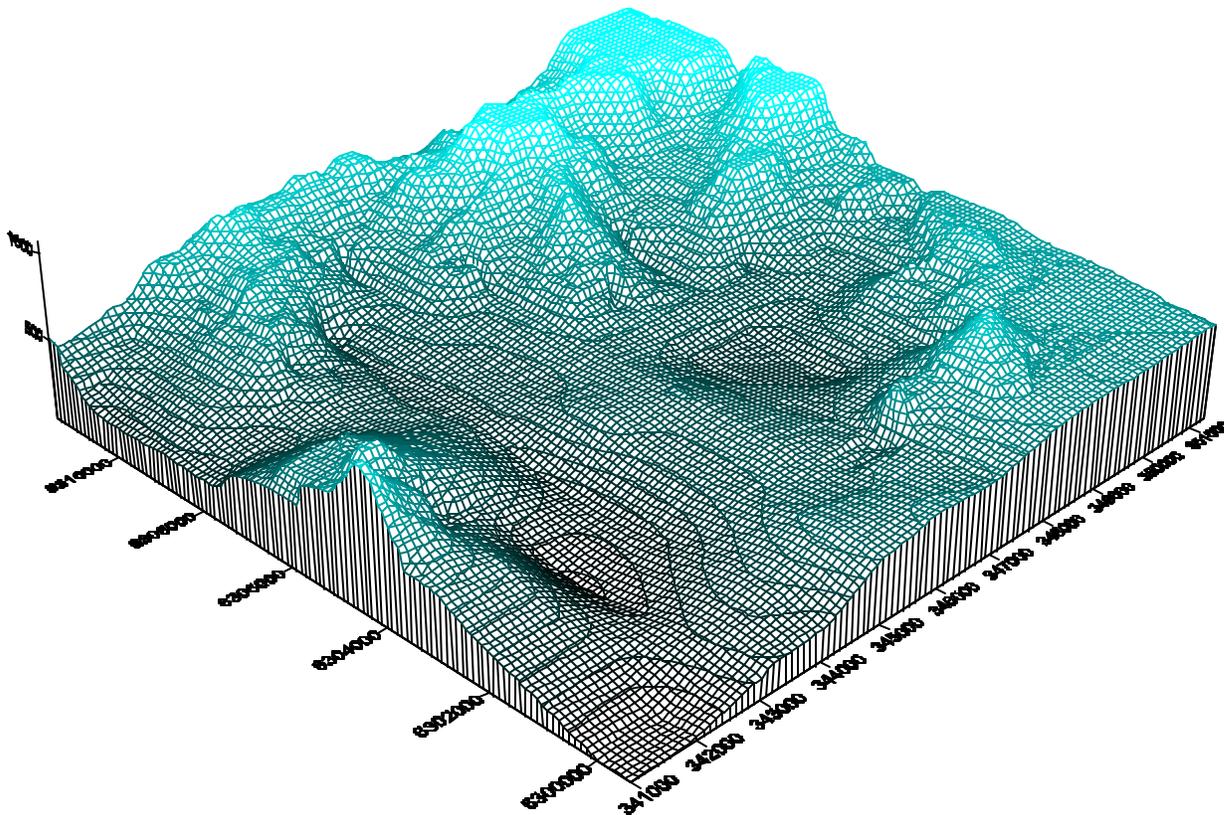
La Depresión Intermedia, donde se encuentra el acuífero en estudio, se encuentra caracterizada por la cuenca de Santiago, encerrada por el norte por el Cordón Chacabuco y al sur por el Cordón Angostura de Paine. El origen de la cuenca se considera tectónico. Se caracteriza por el afloramiento de cerros islas como por ejemplo los cerros Santa Lucía, Renca, Colorado, Blanco, Chena, Lo Aguirre y Lonquén.

La erosión del macizo cordillerano, con el consecuente transporte y depositación de este material en la cuenca de Santiago, es la causa de los depósitos cuaternarios que se encuentran en el área de estudio. Según Karzulovic (1958), estos depósitos habrían sido acarreados principalmente a lo largo de tres períodos glaciares intercalados con otros tantos interglaciares o aluviales, unidos al hecho de que los cauces de los ríos principales experimentaron fuertes desplazamientos durante los diversos períodos aluviales. La formación de gruesos depósitos de cenizas riolíticas ignimbríticas ocupó gran parte de la morfología existente a la fecha. Estos depósitos provinieron de flujos piroclásticos incandescentes originados durante eventos explosivos del volcán Maipo. Con posterioridad éstos se erosionaron en diferente grado y fueron recubiertos parcialmente por sedimentos lacustres, fluviales y abanicos aluviales (Karzulovic, 1958).

2.3.2 Basamento Rocoso

El basamento de la zona de estudio correspondería a rocas volcánicas de la Formación Abanico, de edad oligocena superior – miocena inferior (Charrier y Munizaga, 1979). El fondo de la cuenca corresponde a una superficie irregular sepultada casi totalmente por grandes y extensas acumulaciones de sedimentos fluviales y torrenciales en forma de abanico, asociado principalmente al río Mapocho. Se reconocen cordones enterrados que limitan subcuencas y de los cuales sobresalen algunos cerros islas, en el AZNS el Cerro Blanco. La profundidad a la cual se encuentra el basamento rocoso aumenta desde los mantos rocosos de los cordones Manquehue y San Cristóbal de nor-este a sur-oriente, observándose depresiones abruptas que llegan hasta los 200 m de espesor. En la Figura 2.10 se presenta el relieve del basamento rocoso.

Figura 2.10
Basamento Rocoso



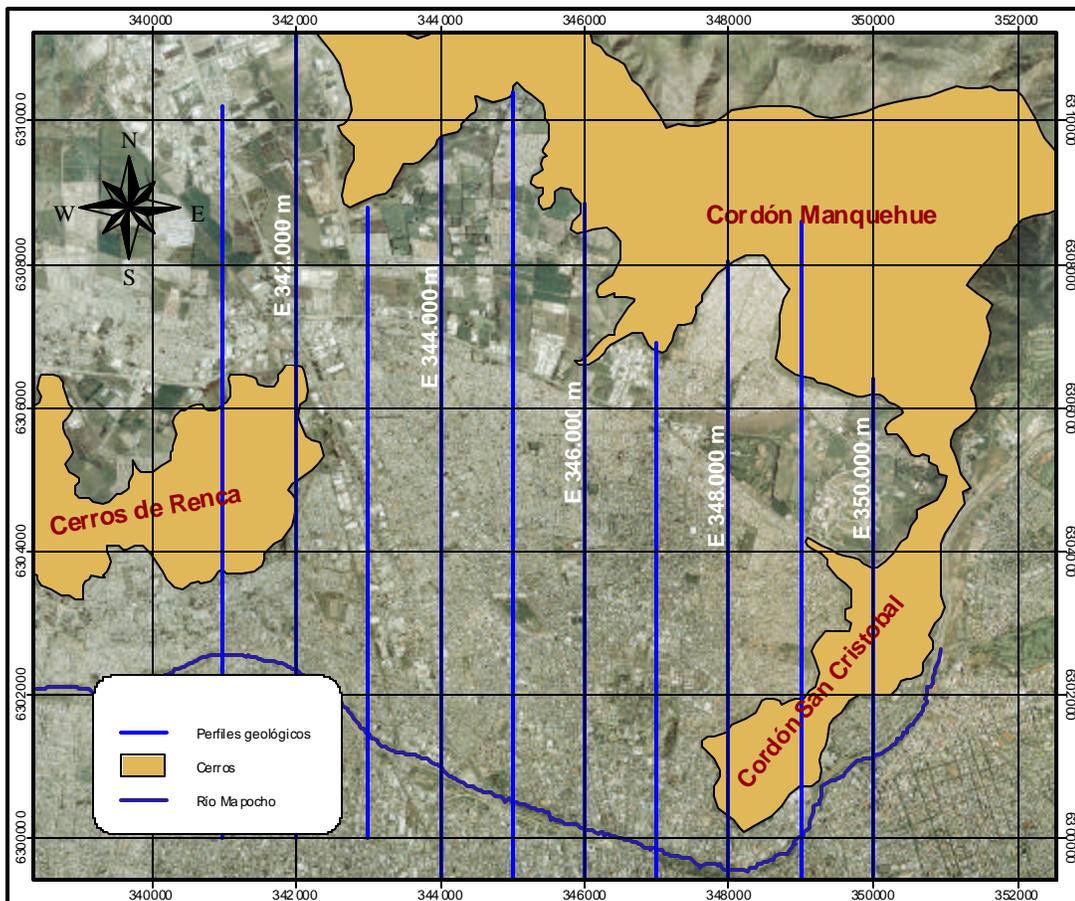
Fuente: elaboración propia.

2.3.3 Formaciones Acuíferas

Las formaciones acuíferas del AZNS están muy relacionadas con el mecanismo en que fue rellenada la cuenca. Los abanicos aluviales depositaron el material más grueso en los sectores ápicos, debido a la pérdida de la capacidad de transporte de los materiales gruesos, mientras que los materiales finos alcanzan zonas más distales. En el estudio AC (2000), se distinguen 3 unidades hidrogeológicas a partir de la información estratigráfica de 83 pozos y de 12 perfiles geológicos de orientación norte sur, los que se presentan en la Figura 2.11.

Unidad A: consistente principalmente (>70%) en materiales muy finos como limos y arcillas, algo arenosos a gravosos, y pequeñas cantidades de ripio y bolones. También presenta niveles de ceniza de la ignimbrita Pudahuel al norte de los cerros de Renca. Debe su origen a la acción fluvial del abanico del río Mapocho, el cual depositó en su parte más distal estos sedimentos que fueron arrastrados por todo su curso. Esta unidad corresponde geológicamente a los sedimentos cuaternarios denominados Depósitos Aluviales del Río Mapocho. En la zona noroeste de Huechuraba, esta unidad confina al acuífero, pero hacia el sur presenta un gradual incremento de sus intercalaciones de materiales gruesos, originando un acuífero semiconfinado. Su potencia máxima estimada es de 55m.

Figura 2.11
Perfiles Geológicos en el AZNS



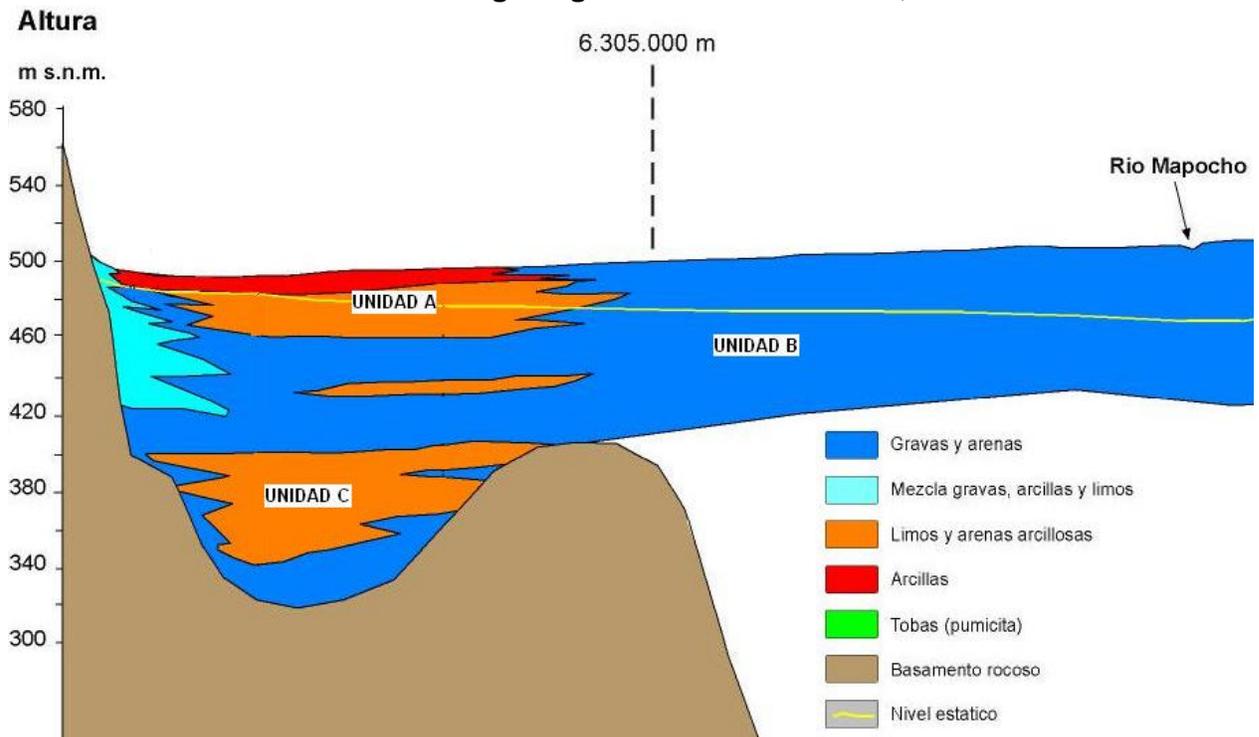
Fuente: elaboración propia.

Unidad B: está constituida por sedimentos de granulometría principalmente gruesa, como gravas y arenas, con algunas intercalaciones de ripios redondeados, además de pocos finos incluyendo niveles de pómez en ciertos sectores al norte y sur de los cerros de Renca, y adyacente a los cerros del cordón Huechuraba. La matriz es arenosa y areno arcillosa. Subyace a la Unidad A, y constituye el medio permeable para almacenar el agua. Además, es la de mayor extensión areal. Los sedimentos de esta unidad son producto de la acción fluvial del río Mapocho, en cuyo ápice se depositaron estos materiales gruesos, correspondiendo a la misma unidad geológica anterior. Su prolongación se observa a lo largo de toda la zona de estudio. Hacia el noroeste (cerros Renca) forma delgadas franjas, siendo en ciertos tramos casi completamente arenoso. Hacia el este y sur de la zona de estudio adquiere gran envergadura. De la información estratigráfica disponible puede estimarse su potencia en unos 150 m aproximadamente, aunque la gravimetría señala mayores espesores, pero con los datos disponibles no puede conocerse si continúa esta misma unidad o corresponde a otra.

Unidad C: Agrupa a limos y arcillas, con algo de arenas y gravas, siendo esencialmente igual a la Unidad A en origen y sedimentación, pero más antigua. Es producto del mismo abanico aluvial, por lo que está dentro de la unidad geológica Aluvial del Mapocho, la que, según antecedentes gravimétricos, tendría un espesor aproximado de 48 m en la zona de estudio. Generalmente se encuentra subyacente a B, pero hacia el este de Renca pierde su continuidad lateral, convirtiéndose en lentes insertos dentro de las gravas y arenas.

Las distintas unidades hidrogeológicas se muestran en la Figura 2.12, la que contiene el Perfil UTM E:343.000.

Figura 2.12
Unidades Hidrogeológicas. Perfil UTM E: 343,000 m

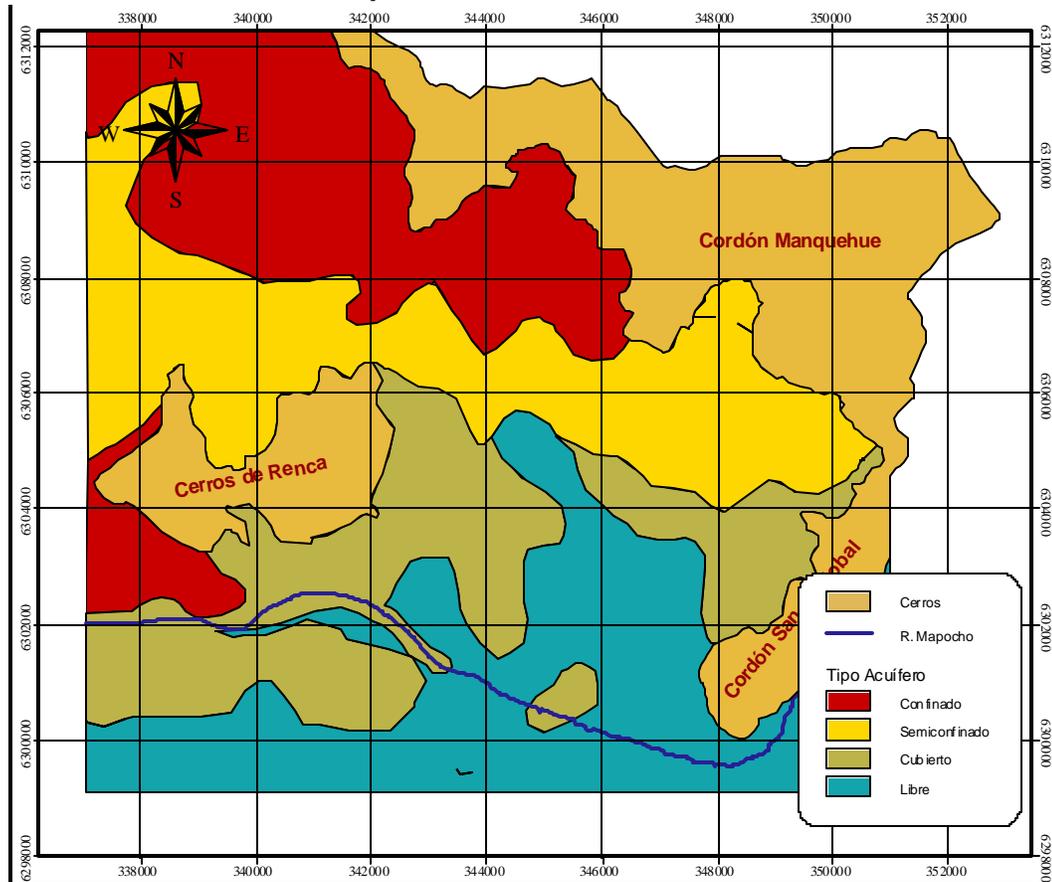


Fuente: Iriarte, 2003

De acuerdo a la distribución de las unidades hidrogeológicas se puede distinguir cuatro tipos de acuíferos, según el grado de confinamiento de las aguas que contienen. Éstos se presentan en la Figura 2.13.

- **Acuíferos libres:** son aquellos en que el agua subterránea se encuentra llenando los poros por gravedad, presentando una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica, como límite superior de la zona de saturación. Esta superficie libre se conoce como superficie freática.
- **Acuíferos confinados:** en ellos una capa de muy baja permeabilidad imprime presión al agua subterránea, de modo que si se extrae agua ningún poro se vacía, sólo disminuye la presión confinante.
- **Acuíferos semiconfinados:** al igual que los acuíferos confinados los acuíferos semipermeables se encuentran a presión, pero el grado de confinamiento es menor, existiendo algunas capas que permiten cierta filtración.
- **Acuíferos cubiertos:** son acuíferos en que sobre el nivel freático existe una granulometría fina que lo cubre. Estos acuíferos podría tornarse semiconfinados o confinados ante un aumento del nivel freático.

Figura 2.13
Tipos de Acuíferos en AZNS



Fuente: AC (2000).

2.3.4 Propiedades Hidrogeológicas

En la Figura 2.14 y en la Tabla 2.3 se representan zonas y valores con información de transmisividad obtenidas del estudio AP (1993). La transmisividad se obtuvo aquí como el caudal específico (l/s) multiplicado por el factor 250 ($T=Q_e \cdot 250$). El caudal específico es el que ha resultado de múltiples pruebas de bombeo realizadas al habilitar los sondajes. Los datos tienen gran variabilidad espacial, encontrándose valores de 100-300 m²/día en zonas de 2,000-5,000 m²/día. Es por ello que la Figura 2-16 muestra a grandes rasgos la distribución general de transmisividad en la zona de estudio, encontrándose las zonas de menor transmisividad (<500 m²/día) en las cercanías del cordón Huechuraba y San Cristóbal, aumentando hacia el este, hasta llegar a valores de 6,500 m²/día al sur de los cerros de Renca.

Con respecto al coeficiente de almacenamiento, se tiene información del estudio antes mencionado y el estudio AC (2000), que su valor es del orden del 10%. Si bien su valor es variable, sólo se conoce su orden de magnitud, por lo que inicialmente se adopta un valor de 10% para todo el AZNS.

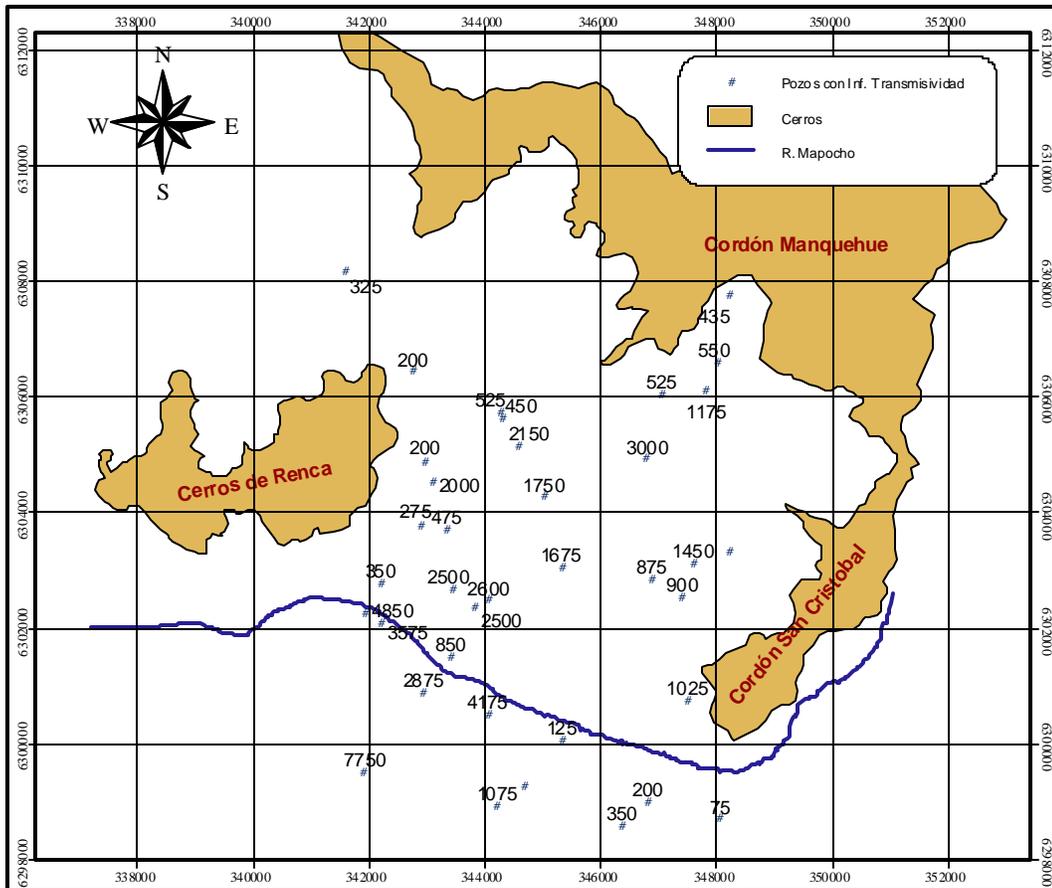
Tabla 2.3
Valores de Transmisividad en AZNS

ROL CORFO	ESTE	NORTE	NOMBRE	Q ESP (l/s/m)	T (m3/dia/m)
3320-7030-AA04	348,110	6,307,780	DOS 445	1.7	435
3320-7030-AA09	347,911	6,306,605	La Pincoya 1 N° 92	2.2	550
3320-7030-AA12	346,950	6,306,062	Pob. Sta. Victoria	2.1	525
3320-7030-AA14	347,708	6,306,137	El Esfuerzo N° 157	7.7	1,175
3320-7030-AC10	347,483	6,303,144	Quinta Bella N° 3	5.8	1,450
3320-7030-AC16	347,290	6,302,560	Calzados Beltrán	3.6	900
3320-7030-AC20	345,213	6,300,099	Curtiembre Melero	0.5	125
3320-7030-AC22	348,095	6,303,364	Cementerio Israelita	4.9	1,225
3320-7030-AC27	345,200	6,303,080	Hipódromo Chile	6.7	1,675
3320-7030-AC29	346,681	6,304,952	Lo Aranguiz N° 78	12.0	3,000
3320-7030-AC34	346,765	6,302,863	Pinturas Ceresita	3.5	875
3320-7030-CA48	347,940	6,298,720	Asistencia Publica	0.3	75
3320-7030-CA55	346,690	6,299,010	Hotel Crillón	0.8	200
3320-7030-CA56	346,250	6,298,610	Edificio Entel	1.4	350
3320-7030-CA65	347,377	6,300,773	Academia de Humanidades	4.1	1,025
3320-7040-BB06	341,460	6,308,180	Población Huechuraba	1.3	325
3320-7040-BB07	344,184	6,305,669	Juanita Aguirre N° 90	1.8	450
3320-7040-BB17	342,647	6,306,467	Huamachuco N° 104	0.8	200
3320-7040-BB26	344,143	6,305,750	Juanita Aguirre Pozo N° 2/149	2.1	525
33207040-BD06	343,300	6,301,540	Central Renca	3.4	850
3320-7030-BD11	343,950	6,302,520	Emb. Chilenas Unidas N°1	10.4	2,600
3320-7040-BD16	342,078	6,302,804	Renca 2 N° 1	1.4	350
3320-7040-BD26	344,901	6,304,287	La Palmilla N° 7	7.0	1,750
3320-7040-BD28	344,462	6,305,162	El Carmen N° 59	8.6	2,150
3320-7040-BD37	342,980	6,304,570	Industria metalúrgica AZA	8.0	2,000
3320-7040-BD38	343,315	6,302,700	Hilandería Renca	10.0	2,500
3320-7040-BD42	343,710	6,302,370	Supermercados Unimarc	10.0	2,500
3320-7040-BD51	342,860	6,304,920	Panamericana Norte 4750	0.8	200
3320-7040-BD53	341,820	6,302,280	Pesquera Peñuelas	19.4	4,850
3320-7040-BD56	343,220	6,303,740	Panamericana Norte 4000	1.9	475
3320-7040-BD58	342,797	6,303,811	Química Souyet	1.1	275
3320-7040-DB39	344,570	6,299,285	Plaza Yungay	0.7	162,5
3320-7040-DB53	344,095	6,298,950	Panificadora San Camilo	4.3	1,075
3320-7040-DB62	342,090	6,302,100	Cristalerías Yungay	14.3	3,575
3320-7040-DB63	343,930	6,300,540	Industria Lever 1	16.7	4,175
3320-7040-DB68	341,775	6,299,550	Rec. Armada Quinta Normal	31.0	7,750
3320-7040-DB69	342,820	6,300,910	Carrascal 4213	11.5	2,875

2.3.5 Distribución de Nivel Estático

Para una representación espacial de los niveles estáticos se debe contar con observaciones bien distribuidas. En el estudio AC (2000), se realizaron campañas de encuestas y medición de niveles estáticos durante el primer semestre de 1998, recopilando gran cantidad de información para este efecto.

Figura 2.14
Distribución de Transmisividad en AZNS



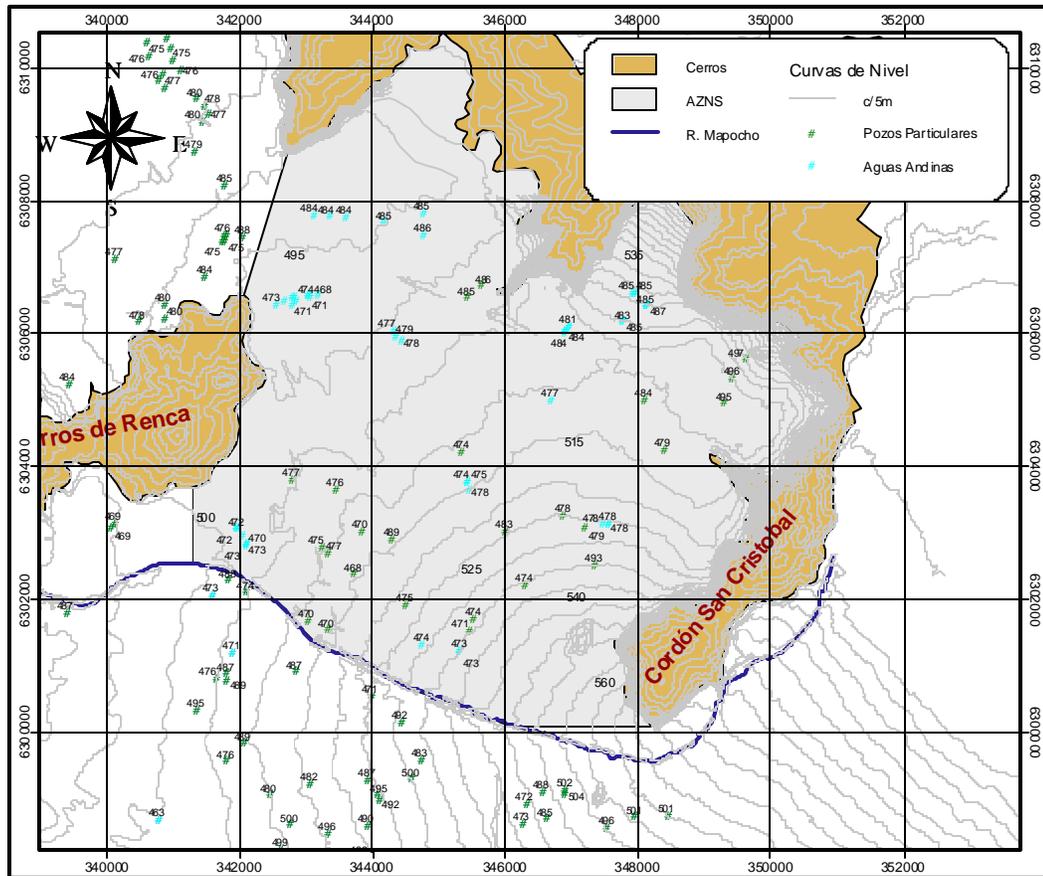
Fuente: AP (1993)

En el presente estudio se seleccionaron los pozos correspondientes al AZNS y sus alrededores, corrigiéndose las cotas, para lo cual se contrastó su posición con la información de las curvas de nivel (cada 5 m). En la Figura 2.15 se observa la tendencia de los niveles estáticos de 1998, que disminuyen hacia el nor poniente. Pueden observarse niveles locales que no reflejan la tendencia general de los niveles debido a zonas de interferencia de pozos (superposición de conos de depresión) y a posibles errores de anotación en las campañas de terreno.

Con respecto a la variación temporal de los niveles, se ha recopilado información de los estudios AC (2000) y AP (1993), de Aguas Andinas y de campañas realizadas en terreno. En la Tabla 2.4 se presenta un resumen de los datos recopilados los que se han agrupado en un número de pozos o sectores característicos, habiendo promediado los niveles para cada año. La agrupación de pozos se indica en la Figura 2.16.

En la Figura 2.17 se presenta la distribución temporal de los niveles estáticos en los macropozos o sectores característicos, en los que se evidencia un abrupto descenso del nivel del orden de 1.8 m/año hasta 1996, año en donde los niveles se estabilizan, registrando algunos descensos de 0.5 m/año.

Figura 2.15
Niveles Estáticos Medidos en Campaña Año 1998



Fuente: elaboración propia.

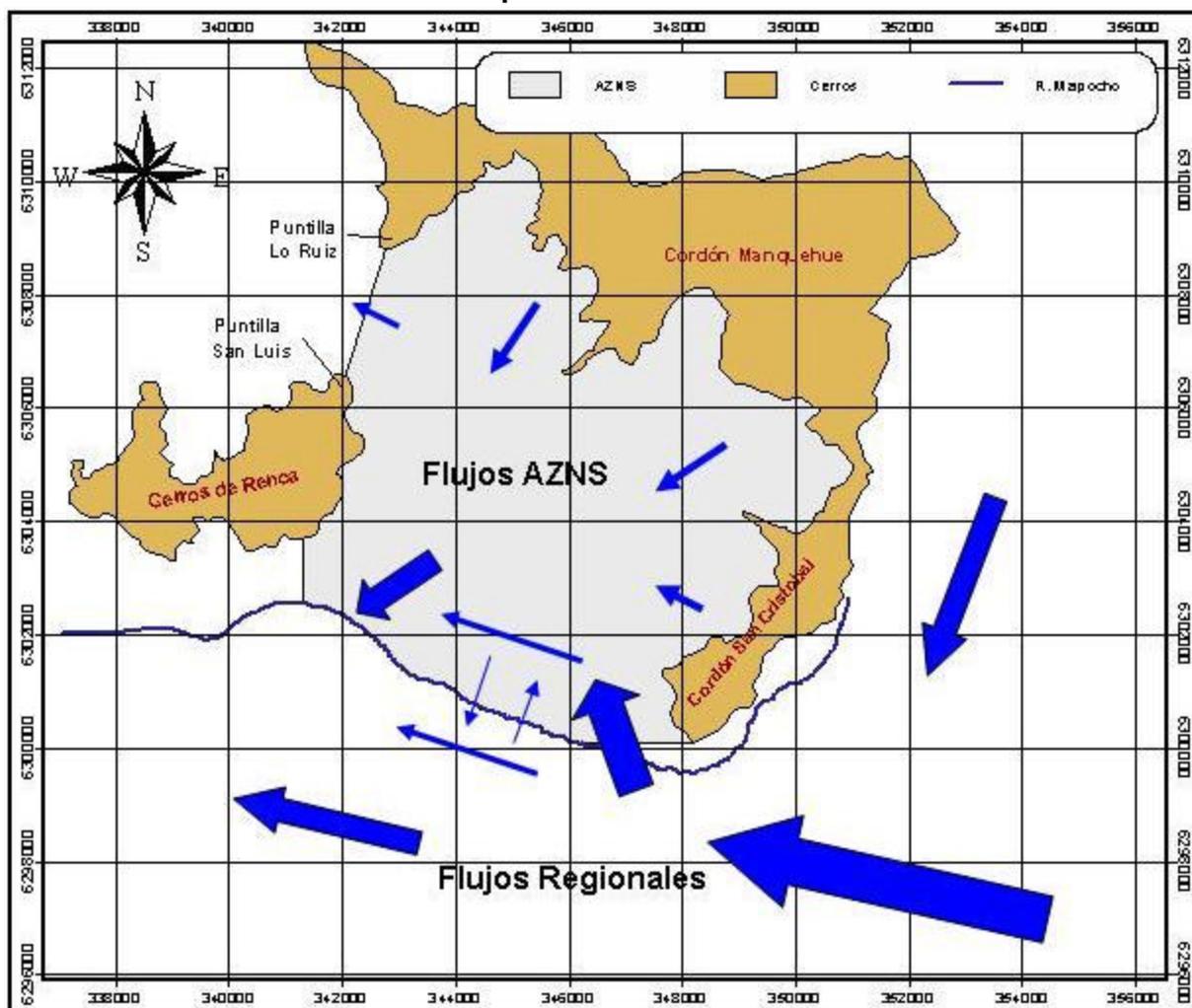
Tabla 2.4
Resumen Niveles Estáticos

Grupo Pozos	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Nº años c/datos
Renca I	341.999	6.302.958	501.9				484.2	480.6	479.3	481.4		472.9	470.7	471.0	467.5	469.2			472.6	10
Huamachuco	342.813	6.306.515	497.9	490.5		486.6	485.2	480.4	483.4	481.7	479.7	475.5	477.2	472.6	471.6	474.2			471.2	13
J. Aquirre	344.328	6.305.963		492.3		490.2	488.1	486.0		483.9		481.6							477.5	7
Santa Victoria	346.913	6.306.058	509.0			493.6	489.8	479.4		487.8		487.3	482.9	482.1	485.6	482.7		483.6	484.4	11
Pincoya I	347.927	6.306.606	521.5				492.3	490.1		486.4		484.7	483.1	485.1	484.5	484.5			486.0	9
Pincoya II	348.118	6.306.407	520.0				493.7	490.4		490.4	490.1	488.5	484.0	485.9	485.8	484.8			485.0	10
El Esfuerzo	347.754	6.306.183	514.0				495.0					486.0	482.5	483.4					484.6	5
Lo Aranzuiz	346.601	6.305.014	510.8	493.7		490.0	487.8	487.3											477.4	5
Vivaceta	344.765	6.303.254	516.4							484.6		477.6	483.4							3
Perez Cotapo	345.409	6.303.686	515.5					489.7				476.6	475.5	474.9	473.4	473.2			475.9	7
Quinta Bella	347.502	6.303.125	526.6					487.5	486.7				476.4	478.2	477.7	476.4			478.2	7
J.A. Ríos	344.735	6.301.307	535.4	483.6							482.4	477.2							473.1	4
DGA 5730024-8	343.272	6.304.274	505.0	489.6	489.7	486.2	485.3	486.7	484.8	481.7	481.8									8
DGA 5730021-3	345.871	6.300.156	544.0	493.8	495.4	489.7														3
DGA 5730025-6	341.970	6.301.726	502.0	487.5	483.0	480.4	479.1	480.3	476.8	475.3	473.7	472.3								9
Nº Pozos c/ datos				5	0	5	11	12	3	11	7	17	13	9	8	9	0	1	21	-
Promedio	-	-	-	489.3	489.4	487.4	486.7	484.1	482.2	481.5	480.6	478.2	477.1	479.1	478.0	476.5	-	483.6	477.3	5.7

2.3.6 Modelo Conceptual de Flujos

Con la información de los niveles estáticos se puede inferir la tendencia general del flujo subterráneo, que va desde este a oeste, bajando desde el cordón Huechuraba hacia los cerros de Renca. Tal como se muestra en la Figura 2.18, se evidencia un notorio aporte subterráneo entre el Puente Manuel Rodríguez y el cerro San Cristóbal, acrecentado por la impermeabilización del cauce del río Mapocho. La tendencia general de las líneas de flujo es seguir la dirección longitudinal del río, sin embargo, existen flujos que van de sur a norte y viceversa. El flujo subterráneo abandona la zona por el oeste entre la puntilla de Lo Ruiz y San Luis (cerros de Renca) y entre los cerros de Renca y el río Mapocho.

Figura 2.18
Modelo Conceptual Modelo Numérico AZNS



2.4 Balance Hídrico

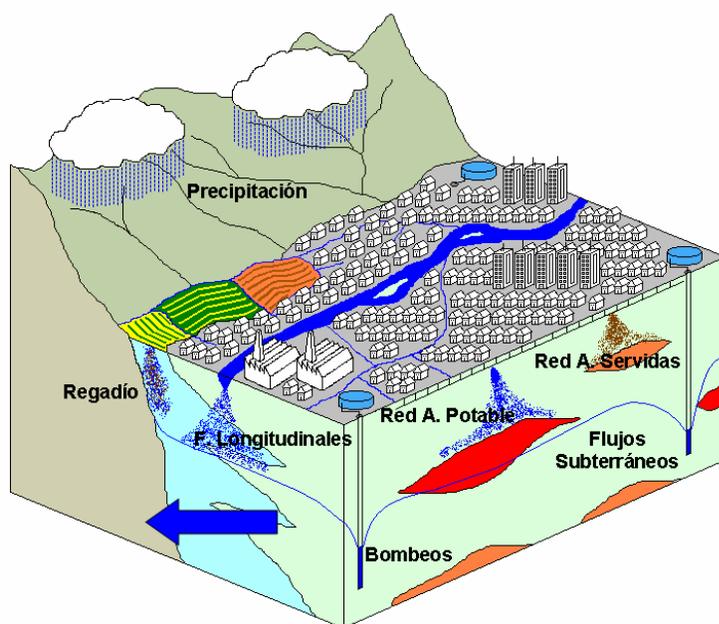
2.4.1 Antecedentes Generales

Todo acuífero se puede idealizar como un sistema acotado al cual ingresan y egresan aportes hídricos, tal como se muestra en la Figura 2.19. Los ingresos al sistema lo constituyen los flujos subterráneos de acuíferos aledaños y las recargas, que provienen principalmente de la infiltración de fuentes longitudinales, pérdidas de la red de agua potable y alcantarillado, del regadío predial y de las lluvias. En tanto que los egresos lo constituyen las extracciones a través de pozos de bombeo y a la descarga de flujos subterráneos

El AZNS obtiene sus recursos hídricos mayoritariamente de la infiltración de la red de agua potable y alcantarillado, del canal El Carmen y del regadío en los sectores todavía no urbanizados de la comuna de Huechuraba. Si bien la infiltración del río Mapocho es considerable, tomando en cuenta el modelo conceptual de flujos del acápite 2.3.7, se puede inferir que debido a los flujos regionales, las infiltraciones del río Mapocho ejercen una recarga más bien local, haciendo abandono del AZNS. En tanto la descarga del sistema la constituyen las extracciones de los sondajes de Aguas Andinas y de pozos particulares de uso principalmente industrial.

En este apartado se presenta la metodología con que se estimó las recargas y descargas a las que está afecto el sistema acuífero. El análisis hídrico se realiza en base a la información mensual disponible entre el año 1988 y 2003, sin embargo la modelación propiamente tal se llevará a cabo a partir de 1997. Al final de este punto se presenta un resumen anual de los valores de las recargas y descargas.

Figura 2.19
Esquema Conceptual Balance Hídrico de AZNS



Fuente: Carrasco (2005)

2.4.2 Recargas

A continuación se indican las consideraciones realizadas para el cálculo de cada una de las recargas y descargas al que está afecto el AZNS.

2.4.2.1 Infiltración de Fuentes Longitudinales

Para el balance se considera como elementos de infiltración longitudinales al río Mapocho y el canal del Carmen. Los demás canales que cruzan la zona de estudio lo hacen revestidos, por lo que sus posibles infiltraciones se desprecian.

a) Río Mapocho

La infiltración de un río depende principalmente de dos factores:

- Perímetro mojado
- Caudal

El perímetro mojado se asocia a la longitud de contacto del agua con el lecho del río. A medida que el perímetro mojado aumenta, la infiltración también lo hace debido al incremento de la superficie de contacto con el lecho. Si bien el lecho de río tiene un ancho medio de 30 m, la franja de agua en él es menor y varía dependiendo del caudal pasante.

La influencia del caudal sobre la infiltración tiene relación con la capacidad de arrastre y depositación de los materiales finos sobre el lecho. Menores caudales favorecerán la depositación de materiales finos, disminuyendo la capacidad de infiltración. Al contrario los caudales de crecida provocan agitación del lecho, removiendo la capa de finos lo que conlleva a una mayor infiltración.

La cuantificación de la tasa de infiltración para el río Mapocho está avalada por estudios realizados por el Departamento de Recursos Hídricos de CORFO en calidad de patrocinador de Darío Barros, en su tesis para optar al título de ingeniero Civil en la U.C. en 1971-1972. Las experiencias de infiltración Corfo – Barros consistieron principalmente en uso de infiltrómetros en la primera sección del río, en las cercanías del cerro Alvarado en la comuna de Vitacura, por lo que su extrapolación al tramo aguas abajo del puente Manuel Rodríguez debe ser usado con precaución. (AP, 1993).

En la Tabla 2.5 se indican las infiltraciones y los rangos de caudales considerados por Corfo-Barros para días normales y de crecida.

Tabla 2.5
Infiltración y Rango de Caudales para Infiltración Corfo-Barros

Infiltración	Rango Caudales [m ³ /s]	Infiltración [l/s/Há]
Días Normales	3<Q<15	40
Días Crecida	Q>15	80

Caudales Mapocho en los Almendros

Dado que los caudales del río Mapocho en la zona de estudio son mayores que en la zona alta, (debido a los diversos aportes que experimenta) y a que la conformación de los depósitos fluviales aguas abajo tienden a intercalar mayor cantidad de fino que en la zona alta se han definido las infiltraciones que se indican en la Tabla 2.6. Aquí se considera el caudal de crecida

como aquél que sobrepasa en 1.25 veces el caudal medio mensual (27m³/s) (de estadística Mapocho Rinconada Maipú 1961-2002). Para caudales normales se establece que el flujo abarca la mitad del lecho del río.

Tabla 2.6
Infiltración y Rango de Caudales para Infiltración

Infiltración	Rango Caudales [m ³ /s]	Ancho Cauce [m]	Infiltración [l/s/Há]
Días Normales	3<Q<15	15	30
Días Crecida	Q>15	30	70

Caudales Mapocho en Rinconada de Maipú

Sólo se consideran aportes hídricos de infiltración en el tramo no revestido del río Mapocho, aguas abajo del puente Manuel Rodríguez. Dado que el río Mapocho constituye el límite del AZNS se considera la mitad del ancho definido en la Tabla 2.6 para el cálculo de la infiltración.

Para el cálculo del caudal de infiltración del río Mapocho al AZNS se utilizó la siguiente expresión:

$$Q_{Inf_Mapocho} = I_{Mapocho} \cdot \frac{b_{Mapocho}}{2} \cdot L_{Mapocho} \cdot \frac{86.400 \frac{s}{día} \cdot Dm \frac{día}{mes}}{1000 \frac{l}{m^3} \cdot 10.000 \frac{m^2}{Há}}$$

Los parámetros se describen en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7
Parámetros Infiltración Río Mapocho

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
$Q_{Inf_Mapocho}$	caudal de infiltración del río Mapocho	m ³ /mes	variable
$I_{Mapocho}$	infiltración del río Mapocho	l/s/há	20-40
$b_{Mapocho}$	ancho medio río Mapocho	m	15-30
$L_{Mapocho}$	longitud tramo infiltrante río Mapocho	m	6,000
Dm	nº de días del mes correspondiente	días	28,29,30 ó 31

b) *Canal El Carmen*

El canal el Carmen constituye la gran fuente longitudinal de recarga del AZNS. Para el cálculo de sus infiltraciones, se toma la adoptada por el estudio AP (1993). Éste estudio supone una tasa de recarga promedio de 20 l/s/há. La infiltración se calculó considerando un ancho medio de 2.5 m y su longitud en el área de estudio, de 18 km.

$$Q_{Inf_Mapocho} = I_{Carmen} \cdot b_{Carmen} \cdot L_{Carmen} \cdot \frac{86.400 \frac{s}{día} \cdot Dm \frac{día}{mes}}{1000 \frac{l}{m^3} \cdot 10.000 \frac{m^2}{Há}}$$

Los parámetros se describen en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8
Parámetros Infiltración Canal El Carmen

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
Q_{Carmen}	caudal de infiltración canal El Carmen	m ³ /mes	variable
I_{Carmen}	infiltración del canal El Carmen	l/s/há	20
b_{Carmen}	ancho medio canal El Carmen	m	2.5
L_{Carmen}	longitud canal El Carmen en AZNS	m	18,000
Dm	nº de días del mes correspondiente	días	28,29,30 ó 31

2.4.2.2 Pérdidas Red de Agua Potable y Alcantarillado

La infiltración de la red de agua potable se consideró como un porcentaje de la pérdida del sistema. La pérdida se considera como la diferencia entre el volumen de agua de abastecimiento y el volumen facturado, estimándose ésta en un 20%. De esta pérdida solo un porcentaje del 30% infiltra al sistema acuífero, ya que el resto se atribuye a extracciones de grifos, robos, y errores en la medición. En tanto la infiltración de la red de alcantarillado se consideró como un porcentaje de los caudales de aguas servidas.

Por lo tanto, el caudal que infiltra por estos conceptos está dado por las siguientes expresiones:

$$Q_{\text{inf}} = CI_{AP} \cdot (P_{AP} \cdot Q_{AP}) + CI_{AS} \cdot (R \cdot Q_{AP})$$

$$Q_{AP} = \frac{D \cdot P_{ob}}{1000 \frac{l}{m^3}}$$

Los parámetros se describen en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9
Parámetros Infiltración Pérdida de la Red de Agua Potable y Alcantarillado

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
Q_{inf}	caudal de infiltración por pérdida de agua potable y aguas servidas	m ³ /mes	-
CI_{AP}	coeficiente de infiltración de la pérdida de agua potable	%	30
CI_{AS}	coeficiente de infiltración de las pérdida del alcantarillado	%	6
P_{AP}	pérdida de agua potable en el sistema	%	20
Q_{AP}	caudal de agua potable	m ³ /día	-
R	factor de recuperación del agua potable	%	80
D	dotación agua potable zona de estudio	l/hab/día	250

2.4.2.3 Regadío Predial

La infiltración por conceptos de regadío en la zona no urbana del acuífero proviene de los aportes hídricos del canal El Carmen, el que dispone de un total de 225.61 acciones, de las cuales el 16% de ellas son utilizadas en la zona de estudio. Por ende el 16% del caudal de cabecera del canal constituye la dotación de regadío para la zona. Para efectos de cálculo se supondrá que la eficiencia de aprovechamiento en el regadío es del 45%, perdiéndose el restante 55% de la dotación. Los caudales que infiltran se estiman en un 25% del agua perdida. Por ende la expresión para el cálculo de la infiltración por regadío predial es la siguiente.

$$Q_{inf} = Ac \cdot Q_{cabecera} \cdot (1 - Ef_{reg}) \cdot CI$$

$$I_{regadío} = \frac{Q_{inf}}{A_{no_urbano}} \cdot 1000 \left(\frac{mm}{m} \right)$$

Los parámetros se describen en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10
Parámetros Infiltración por Regadío Predial

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
Q_{inf}	caudal de infiltración por regadío predial	m ³ /mes	variable
$Q_{cabecera}$	caudal en la cabecera del canal El Carmen	m ³ /mes	variable
Ef_{reg}	eficiencia de regadío	%	45
I_{reg}	infiltración por regadío	mm/mes	variable
A_{no_urbana}	superficie áreas no urbanas	Km ²	5.4 / 8.1
Ac	porcentaje de acciones en área de estudio	%	16
CI	coeficiente de infiltración	%	30

Sólo se cuenta con los caudales medios mensuales de cabecera para el año 1993 y del 2001 al 2003. Dado que estos presentan pequeñas variaciones, se utilizó las estadísticas mensuales del año 1993 para los años 1988-1995 y el promedio mensual de los años 2001-2003 para los años 1996-2003.

2.4.2.4 Precipitación

La infiltración debido a la precipitación tanto en el área urbana como en la no urbana se calcula a partir de un coeficiente de infiltración aplicado a la precipitación efectiva mayor a 7mm/día. Esto quiere decir que toda precipitación menor a 7 mm/día no se contabiliza en la estadística mensual, debido a que las precipitaciones menores a 7mm/día escurren o quedan retenidas en la zona radicular quedando disponibles para ser absorbidas por la vegetación o ser evaporadas. Las expresiones para la infiltración son las siguientes:

$$Q_{urbana} = P_{efectiva} \cdot CI_{urbano} \cdot A_{urbana}$$

$$Q_{no_urbana} = P_{efectiva} \cdot CI_{no_urbano} \cdot A_{no_urbana}$$

Los parámetros se describen en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11
Parámetros Infiltración por Regadío Predial

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
Q_{urbana}	caudal de infiltración zona urbana	m ³ /mes	variable
Q_{no_urbana}	caudal de infiltración zona no urbana	m ³ /mes	variable
$P_{efectiva}$	precipitación efectiva mayor a 7mm	mm	variable
CI_{urbana}	coeficiente de infiltración zona urbana	%	10
CI_{no_urbana}	coeficiente de infiltración zona no urbana	%	60
A_{urbana}	superficie zona urbana	Km ²	45.8
A_{no_urbana}	superficie zona no urbana	Km ²	13.5

2.4.2.5 Escorrentía de Areas Aledañas

La precipitación que cae sobre las áreas aledañas a una zona de estudio y que escurre hacia ella, también se debe considerar en el balance hídrico. La escorrentía es evacuada por ríos y canales o conducida por quebradas a la zona denominada pie de monte, que corresponde a una franja de transición conformada por materiales de origen erosivos, donde se presentan favorables condiciones de infiltración.

En el caso del AZNS, el canal El Carmen intercepta la totalidad de los aportes pluviales que escurre por las laderas y quebradas del cordón Huechuraba y San Cristóbal. Así mismo en algunos sectores de los cerros de Renca se cuentan con una serie de canales al pie de monte, percibiendo las escorrentías superficiales, evitando así que lleguen al acuífero. Si bien no existen canales en todo el perímetro de los cerros de Renca y en el cordón San Cristóbal; desde su punta oeste hasta el túnel por donde cruza el canal El Carmen; la escorrentía superficial escurre a sectores urbanizados impermeabilizados, donde son captadas por los sistemas de evacuación de aguas lluvias y sacados del área de estudio. Por estas razones no se considerarán infiltraciones de aportes hídricos de las áreas aledañas.

2.4.2.6 Flujo Subterráneo

Por el límite sur del AZNS ingresan aportes subterráneos provenientes del acuífero Maipo – Mapocho. AP(1993) estima el flujo en 5.5 millones de m³ anuales, suponiendo que éste hace ingreso por el tramo no revestida del Mapocho. Este resultado es muy cuestionable, dado que, como se ha visto en el acápite 2.3.6, los niveles estáticos en la zona céntrica de Santiago están influidos por efectos de interferencia producto de la densidad de sondajes activos; distorsionando la estimación del gradiente hidráulico. A esto se debe sumar que no existe una distribución homogénea de transmisividades en la zona sur oriente.

2.4.3 Descargas

Las captaciones de pozos se dividieron en dos grandes grupos; las de la empresa sanitaria Aguas Andinas (AA) y los restantes pertenecientes a industrias e instituciones, que se denominaron como pozos particulares (PP).

2.4.3.1 Aguas Andinas (ex EMOS)

Aguas Andinas tiene 63 perforaciones en el área de estudio, de las cuales sólo 16 están operativos en la actualidad. Los restantes fueron reemplazados por nuevos, están fuera de servicio o se activan en casos de emergencia (rotura de matriz, sequía). Cabe destacar que la entonces Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias, EMOS es vendida en 1999 y recién en el año 2001 adopta el nombre de Aguas Andinas.

Los pozos de Aguas Andinas no están provistos de medidores de volumen, por lo que los operarios en terreno son los que registran las horas de funcionamiento para el cálculo del volumen. Esta metodología genera gran incertidumbre y por lo general los registros no son archivados de forma adecuada. Sólo se tiene, con algún grado de certeza, los volúmenes explotados por la empresa el año 2003. Del estudio AP (1993) se obtuvo los registros de volúmenes mensuales de 1988 a 1992, de fuente de la entonces EMOS. También se cuenta con información proporcionada por Aguas Andinas de bombeos mensuales de 1995, 1996 y 2003. En los años 1993 y 1994 se consideran los mismos bombeos de 1988 por presentar éste bombeos promedios del período. En tanto que los bombeos del 2003, considerados como confiables por Aguas Andinas, son considerados a partir de 1997.

2.4.3.2 Pozos Particulares

La información de los pozos particulares en el AZNS se tomó del catastro del estudio AC (2000). En él se subdividen los pozos en operativos, sin uso, abandonados y no encontrados. Dos tercios de los pozos catastrados cuentan con estimaciones de extracción mensual de 1990 a 1998, obtenidas en las campañas de terreno realizada durante enero a julio de 1998. Para los años 1988 y 1989 se extendieron las estadísticas de 1990. En tanto los pozos sin estadísticas se contrastaron con el catastro del estudio de AP(1993) o se le asoció un factor de uso del 30% del caudal de prueba de bombeo, dependiendo de la información disponible. Finalmente sólo el 16% de los pozos ha quedado sin información. En las estadísticas se ha supuesto que los pozos que aparecen sin uso, o abandonados dejaron de bombear en 1996. Este supuesto se basa en la disminución de los niveles freáticos, estabilizándose a partir de ese año.

2.4.3.3 Flujo Subterráneo

El modelo conceptual indica que las descargas de flujos subterráneos se producen en el nor poniente entre la puntilla de Lo Ruiz y San Luis y en el sur oriente entre los cerros de Renca y el río Mapocho. En el estudio AP(1993) se estima estos flujos en 3 millones y 3.2 millones de m³ anuales, respectivamente. Estos valores son cuestionables, ya que los niveles estáticos de 1998 indican que la salida sur poniente se extendería por el sur del río Mapocho. En tanto al norte del límite de la puntilla de Lo Ruiz y San Luis, el acuífero es menos permeable por la presencia de arcillas; dificultando la descarga, por lo que su valor debiera ser, comparativamente menor que el flujo sur oriente (ver Figura 2.18).

2.4.4 Resumen Balance Hídrico AZNS

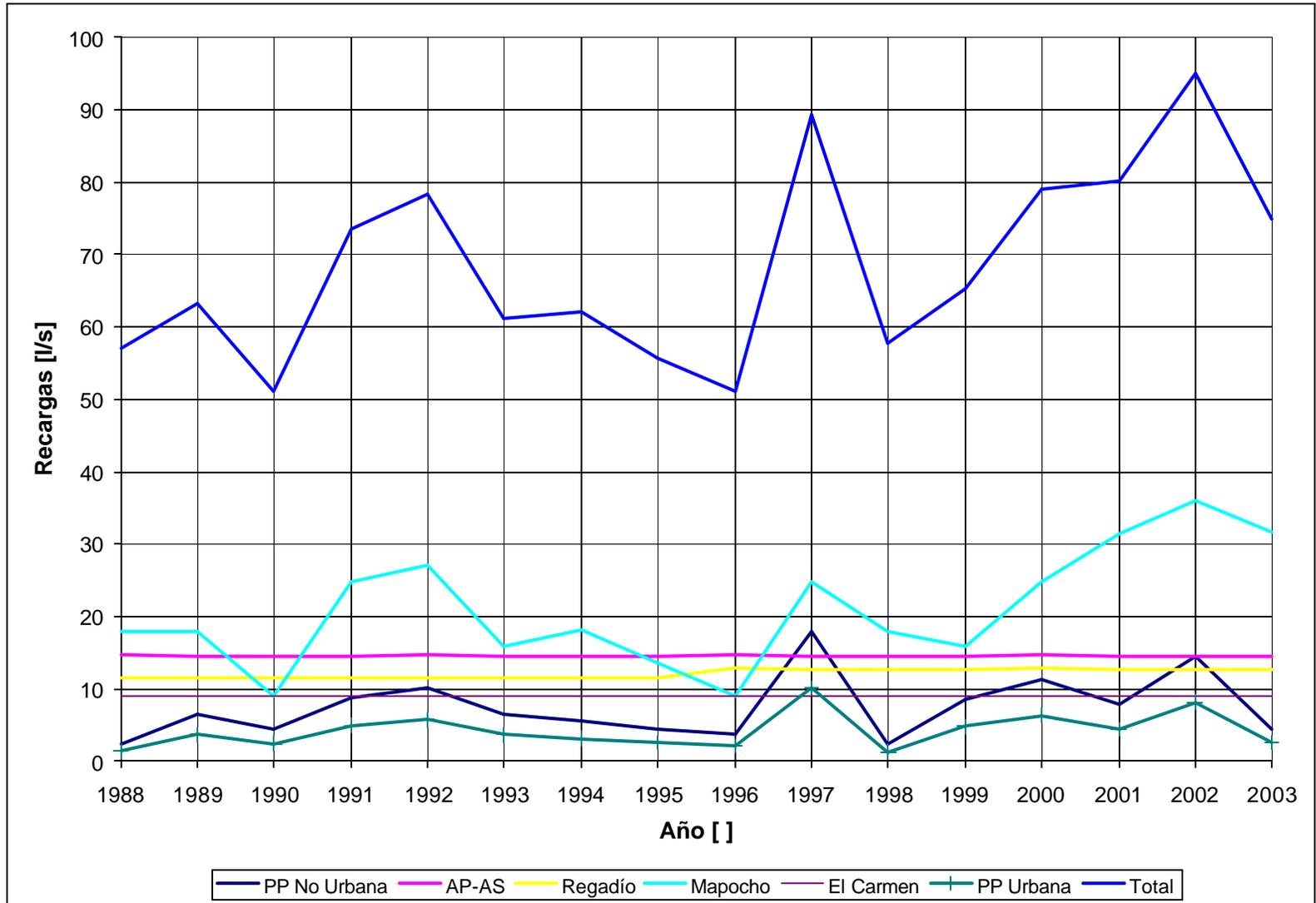
En la Tabla 2.12 se presenta el resumen de los volúmenes anuales que infiltran al AZNS y los volúmenes que son extraídos de él por Aguas Andinas y particulares. Cabe destacar que el modelo subterráneo que se elabora en el presente trabajo de título se integrará en el futuro con el modelo superficial que desarrolla Rojo (2004), por lo que los cálculos del balance corresponden a estimaciones más bien gruesas. Sin embargo son concordantes con los resultados obtenidos a la fecha por Rojo (2004). En la Figura 2.20 se muestra una gráfica de las recargas en mm/años del período 1988 a 2003.

Tabla 2.12
Balance Hídrico Anual AZNS

Año	RECARGAS							DESCARAS			BALANCE [m3]
	Caudal Inf PP Urbana [m3]	Caudal Inf PP No Urbana [m3]	Caudal Inf AP-AS [m3]	Caudal Inf Reg. Predial [m3]	Caudal Inf Mapocho [m3]	Caudal Inf El Carmen [m3]	Total Año [m3]	Bombeo Pozos AA [m3]	Bombeo Pozos PP [m3]	Total Año [m3]	
1988	419,986	742,770	4,620,750	3,668,488	5,668,704	2,846,016	17,966,714	9,087,413	14,740,833	23,828,246	-5,861,532
1989	1,149,122	2,032,290	4,608,125	3,654,064	5,684,256	2,838,240	19,966,097	10,048,889	14,740,833	24,789,722	-4,823,625
1990	781,348	1,381,860	4,608,125	3,654,064	2,838,240	2,838,240	16,101,877	7,277,073	14,647,233	21,924,306	-5,822,429
1991	1,551,704	2,744,280	4,608,125	3,654,064	7,830,432	2,838,240	23,226,845	10,343,838	14,688,057	25,031,895	-1,805,050
1992	1,799,482	3,182,490	4,620,750	3,668,488	8,561,376	2,846,016	24,678,602	7,379,220	12,218,134	19,597,354	5,081,248
1993	1,143,168	2,021,760	4,608,125	3,654,064	4,984,416	2,838,240	19,249,773	9,087,413*	12,134,758	21,222,171	-1,972,398
1994	984,242	1,740,690	4,608,125	3,654,064	5,707,584	2,838,240	19,532,945	9,087,413*	12,228,113	21,315,526	-1,782,581
1995	793,256	1,402,920	4,608,125	3,654,064	4,261,248	2,838,240	17,557,853	10,007,230	12,380,696	22,387,926	-4,830,073
1996	644,864	1,140,480	4,620,750	4,021,566	2,846,016	2,846,016	16,119,692	15,682,510	12,530,131	28,212,641	-12,092,949
1997	3,211,954	5,680,530	4,608,125	4,005,383	7,830,432	2,838,240	28,174,664	7,767,843*	4,765,834	12,533,677	15,640,987
1998	415,406	734,670	4,608,125	4,005,383	5,637,600	2,838,240	18,239,424	7,767,843*	5,127,733	12,895,576	5,343,848
1999	1,514,148	2,677,860	4,608,125	4,005,383	4,961,088	2,838,240	20,604,844	7,767,843*	5,127,733	12,895,576	7,709,268
2000	2,007,414	3,550,230	4,620,750	4,021,566	7,838,208	2,846,016	24,884,184	7,767,843*	5,127,733	12,895,576	11,988,608
2001	1,391,862	2,461,590	4,608,125	4,005,383	9,929,952	2,838,240	25,235,152	7,767,844	5,127,733	12,895,577	12,339,575
2002	2,584,494	4,570,830	4,608,125	4,005,383	11,352,960	2,838,240	29,960,032	7,767,843	5,127,733	12,895,576	17,064,456
2003	791,424	1,399,680	4,608,125	4,005,383	9,976,608	2,838,240	23,619,460	7,767,843	5,127,733	12,895,576	10,723,884
Promedio	1,323,992	2,341,558	4,611,281	3,833,549	6,619,320	2,840,184	21,569,885	8,898,494	9,740,064	18,638,558	2,931,327

* Valores estimados

Figura 2.20
Recargas Promedio AZNS en (l/s)



3. MODELACIÓN NUMERICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Aspectos Generales

En este capítulo se sintetiza la información recopilada en los capítulos anteriores en la construcción de un modelo de simulación de flujos del Acuífero de la Zona Norte de Santiago (AZNS).

Para comenzar, a modo de introducción, se describe el modelo matemático utilizado en la modelación. Posteriormente se describen las condiciones y metodologías consideradas en el armado del modelo, para continuar con la calibración, que constituye el ajuste del modelo con las condiciones observadas en terreno. Para finalizar el capítulo, se describe el proceso de validación de la anterior calibración y se realiza un análisis de sensibilidad de la discretización espacial de la malla del modelo.

3.2 Descripción de Visual MODFLOW

El avance en el campo de la computación en los últimos 15 años ha levantado las restricciones técnicas (computacionales) para la implementación de modelos de simulación más complejos y detallados. La caracterización de los sistemas modelados se tornó más simple, directo y con menores dificultades operativas. El aumento en la cantidad de datos capaces de ser procesados por la nueva generación de computadores, permite representar el comportamiento de los flujos subterráneos en tres dimensiones. Si bien los modelos tridimensionales no presentan ninguna dificultad conceptual con los modelos de dos dimensiones, la gran cantidad de datos a ser procesados hacía difícil su implementación.

Visual Modflow (VMod) fue desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Software en 1995 en base a Modflow, con el propósito de facilitar la implementación y el análisis de los resultados del modelo, mediante un ambiente gráfico que permite el ingreso, modificación e intercambio de información con archivos externos de forma rápida, sencilla y amistosa.

Modflow resuelve la ecuación diferencial que rige el flujo en medios porosos saturados utilizando el método de diferencias finitas, que a través de un número discreto y finito de puntos en el espacio (celdas) y tiempo (períodos) da origen a un sistema de ecuaciones lineales, cuya solución entrega el valor de nivel piezométrico en cada celda y en cada período simulado. El sistema se resuelve mediante iteraciones sucesivas hasta que el valor del nivel piezométrico satisfaga el criterio de convergencia impuesto.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

donde,

K_x, K_y, K_z : conductividades en la dirección x, y "y" z
h : nivel piezométrico
W : flujo por unidad de volumen
 S_s : almacenamiento específico del acuífero
T : tiempo

El programa posee una estructura modular, que consiste en un programa principal y una serie de subrutinas independientes llamadas módulos. Esos módulos están agrupados en paquetes (Packages) asociados a una componente específica de la hidrología del sitio de estudio o al algoritmo de solución con que se resolverá el sistema de ecuaciones que describe el sistema en estudio (González, 1999).

La versatilidad de VMod permite desarrollar mejores modelaciones, ya que se mantiene el control sobre los parámetros de interés, pudiendo simular distintos escenarios con tan sólo efectuar algunos cambios de forma rápida y sencilla, sin necesidad de requerir tiempos exagerados de trabajo.

3.3 Implementación del Modelo

3.3.1 Discretización de la malla

3.3.1.1 Discretización espacial horizontal

VMod sólo permite la elaboración de modelos de geometría rectangular, por lo que la zona en estudio se definió entre los límites siguientes, quedando completamente inscrita en ellos.

Límite Norte	: UTM N 6.310.400
Límite Sur	: UTM N 6.299.800
Límite Oeste	: UTM E 340.800
Límite Este	: UTM E 351.000

Conforme a la calidad de la información disponible, el rectángulo definido por las coordenadas anteriores se discretizó en elementos cuadrados de 200 m, dividiendo la zona en 2.805 celdas, distribuidas en 51 columnas y 55 filas. Se eliminan las celdas sin interés que coinciden con afloramientos de roca y las que se ubican al sur del río Mapocho. En la Figuras 3.1 y 3.2 se muestra la discretización en planta de la zona de estudio.

3.3.1.2 Discretización espacial vertical

Si bien en gran parte el acuífero queda bien representado con una sola capa, por contener materiales grueso en toda su profundidad, en el sector al pie del cordón Huechuraba el estrato de gravas subyace a un estrato de material fino, siendo necesario la implementación de dos capas en todo el modelo para internalizar los efectos de la capa menos permeable.

Para generar la vertical del modelo se digitalizó la información topográfica de la superficie y del basamento rocoso, para construir sus respectivos mantos utilizando el software Surfer. Los mantos se generan con información de cota cada 20 metros planimétricos, lo que asegura una adecuada interpolación de VMod al ser cargados al modelo.

Para dividir la vertical y generar las dos capas, se inserta el manto que separa las dos unidades hidrogeológicas. Este manto se genera con Surfer a partir de la digitalización de la interfase de las unidades en cada perfil transversal. En la Figura 3.3 se presenta un corte vertical en E: 346,700 m.

3.3.1.3 Discretización temporal

La discretización temporal en el período está dada por la frecuencia de los datos de recarga y de bombeo. De acuerdo a esto se establece el intervalo de tiempo en un mes, resultando 48 períodos de calibración y 36 de validación, sumando un total de 84 períodos de simulación.

Figura 3.1
Discretización Primera Capa o Estrato

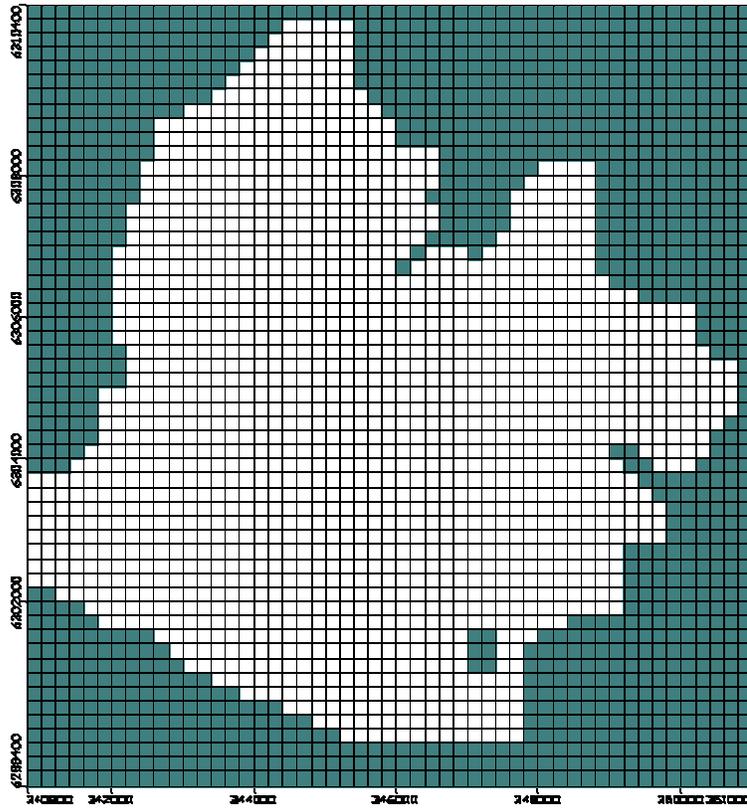


Figura 3.2
Discretización Segunda Capa o Estrato

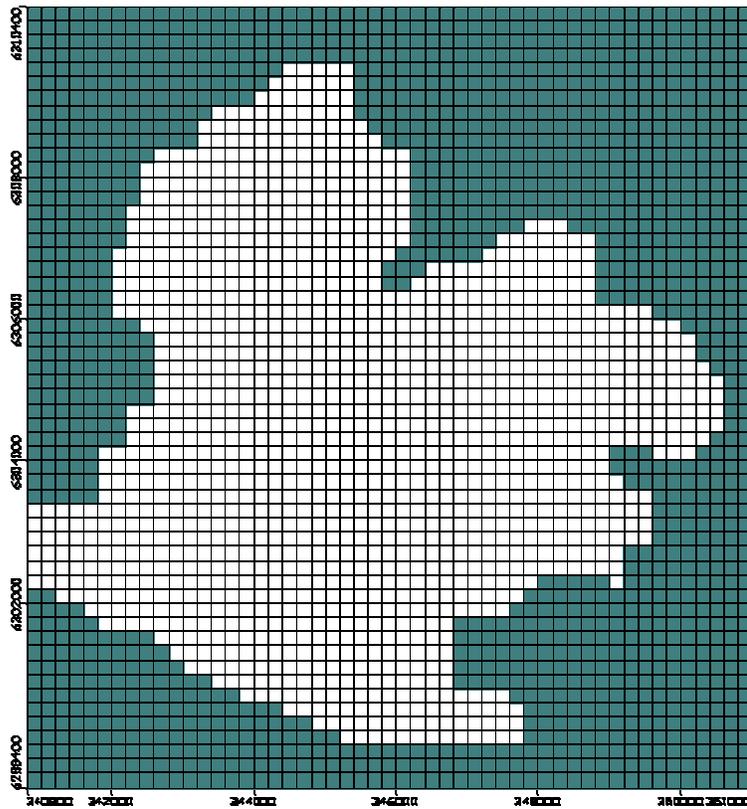
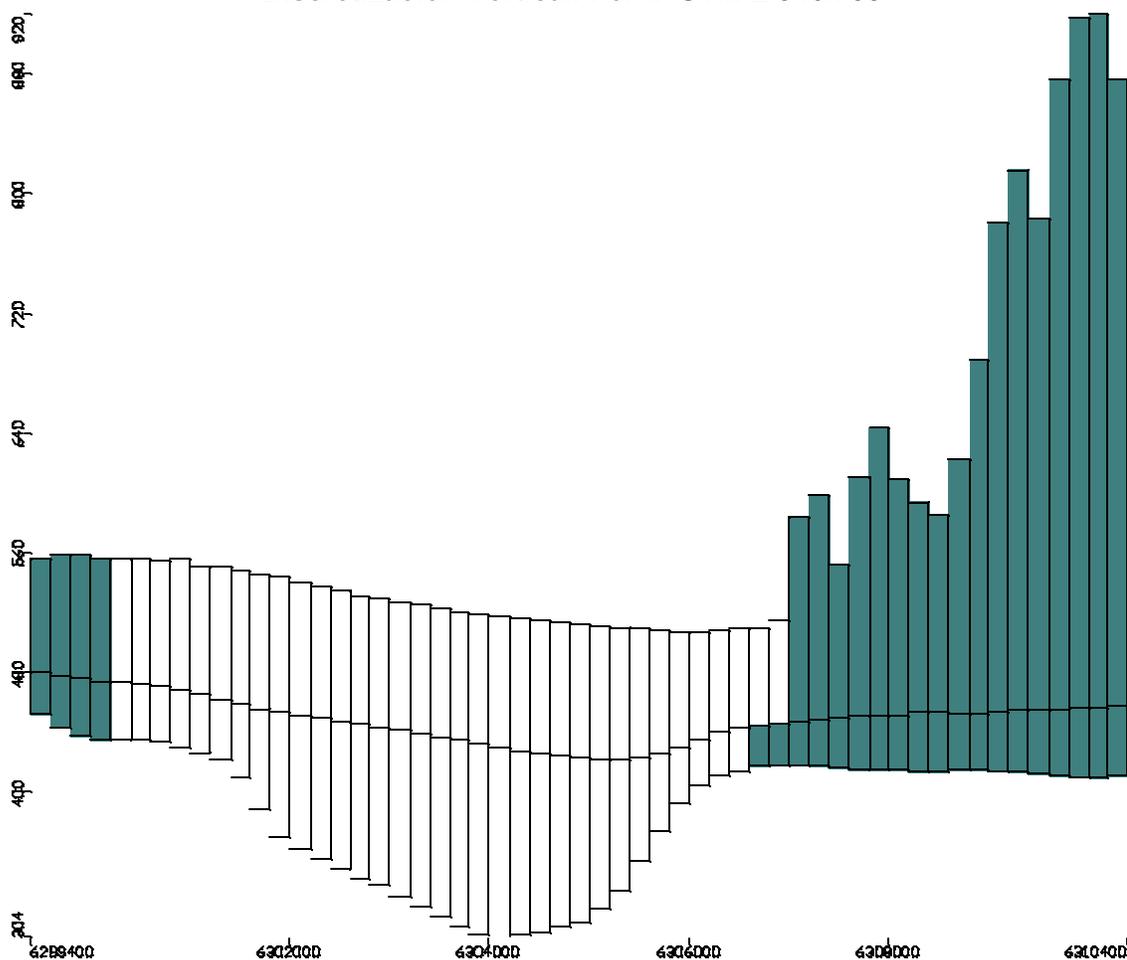


Figura 3.3
Discretización Vertical. Perfil UTM E 346.700



3.3.2 Período de simulación

La elección del período de calibración y validación debe coincidir con el periodo en que se tenga información de las recargas, descargas y de niveles estáticos. Las recargas son determinadas por métodos hidrológicos estándares que dependen de la precipitación, que por lo general es conocida. En cambio la información de bombeos suele ser desconocida y se debe estimar o realizar encuestas en terreno, para minimizar los errores en la estimación de los volúmenes extraídos. De AC (2000), AP (1993) y de Aguas Andinas se tiene información de bombeos y de niveles estáticos de 1988 a 2003. Por motivos que se precisan en el acápite 3.4.3a se adopta el período de 1997 a 2000 para la calibración, extendiéndolo al año 2003 para la validación.

3.3.3 Parámetros hidrogeológicos

VMod requiere de los siguientes parámetros para ejecutar el modelo de flujo y para el cálculo del nivel piezométrico en cada celda:

Conductividad horizontal	: K_x y K_y [m/día]
Conductividad vertical	: K_z [m/día]
Almacenamiento específico	: S_s [1/m]
Capacidad específica	: S_y []

La porosidad sólo se requiere para el cálculo de transporte de partículas, siendo irrelevante para un modelo de flujos. Los parámetros S_s y S_y son utilizados para el cálculo del coeficiente de almacenamiento (S), tanto para acuíferos confinados como libres.

Al disminuir la carga hidráulica en acuíferos confinados, el nivel piezométrico permanece sobre la unidad confinante. En este caso una cantidad de agua es liberada desde almacenamiento, pero el acuífero permanece saturado. El coeficiente de almacenamiento (S) en este caso es el producto del almacenamiento específico (S_s) y del espesor del acuífero (b); $S = S_s \cdot b$ (no se requiere S_y).

En cambio, en acuíferos libres el nivel freático aumenta o disminuye debido a cambios en la cantidad de agua almacenada. Este almacenamiento o liberación de agua se debe a la capacidad específica de la unidad (S_y), así como al almacenamiento específico (S_s) de ella. Para un acuífero no confinado el coeficiente de almacenamiento (S) se calcula como $S = S_y + h \cdot S_s$ donde h es el espesor de la zona saturada del acuífero. Sin embargo ante gradientes hidráulicos menores al 10% se puede despreciar la capacidad específica ($S_y \ll h \cdot S_s$), considerando estos acuíferos como confinados ($S = h \cdot S_s$).

VMod permite modelar suponiendo acuífero libre, confinado, o confinado y libre; determinando el modelo en este último caso, el tipo de acuífero a resolver.

El Modelo se dividió en 5 zonas de propiedades, de acuerdo a la información obtenida de los perfiles transversales. A cada zona se le asocia los valores de permeabilidad de la literatura correspondientes al tipo de material en ellos alojados. Cada zona se considera isotrópica y homogénea, considerando $K_x = K_y$ y $K_z = 0.1 \cdot K_x$. En la Tabla 3.1 se presentan los materiales que conforman el acuífero y los correspondientes valores de conductividad adoptados.

Tabla 3.1
Conductividades Hidráulicas Asignadas Inicialmente según Tipo de Material

Zona Nº	Color VMod	Material	Kx=Ky	Kz
			[m/día]	[m/día]
1		Gravas y arenas gruesas	80	8
2		Conos de deyección. Mezcla gravas, arcillas y limos.	50	5
3		Predominio de Arcillas	1	0.1
4		Predominio de limos y arenas arcillosas	10	1
5		Mezcla de estratos de zonas 1,3 y 4	20	2

Resulta difícil estimar la conductividades para las zonas arriba descritas, ya que en la literatura el rango de las permeabilidades para cada tipo de suelo varía en varios órdenes de magnitud, además los perfiles transversales son interpretativos de información estratigráfica, desconociéndose las proporciones en que se encuentren las gravas, arenas, arcilla, limos y arenas arcillosas en los sectores indicados en los perfiles. En las Figuras 3.4 y 3.5 se muestra la distribución de conductividades asignadas inicialmente en el modelo.

Con respecto al coeficiente de almacenamiento, toda la hoya del río Maipo y Mapocho presentarían valores fluctuantes entre un 10 y 15% según AC (2003), luego el valor no debiera encontrarse muy lejos de éstos. Por ello se considera el valor de 0.1 para la capacidad específica S_y , y de 0.001 [1/m] para el almacenamiento específico S_s .

Durante la calibración, los valores de los parámetros, así como la distribución de las zonas aquí establecidas, podrán cambiar. Sin embargo, estos cambios deberán estar acorde con la información hidrogeológica recopilada.

Figura 3.4
Zona Propiedades Acuífero Primera Capa o Estrato

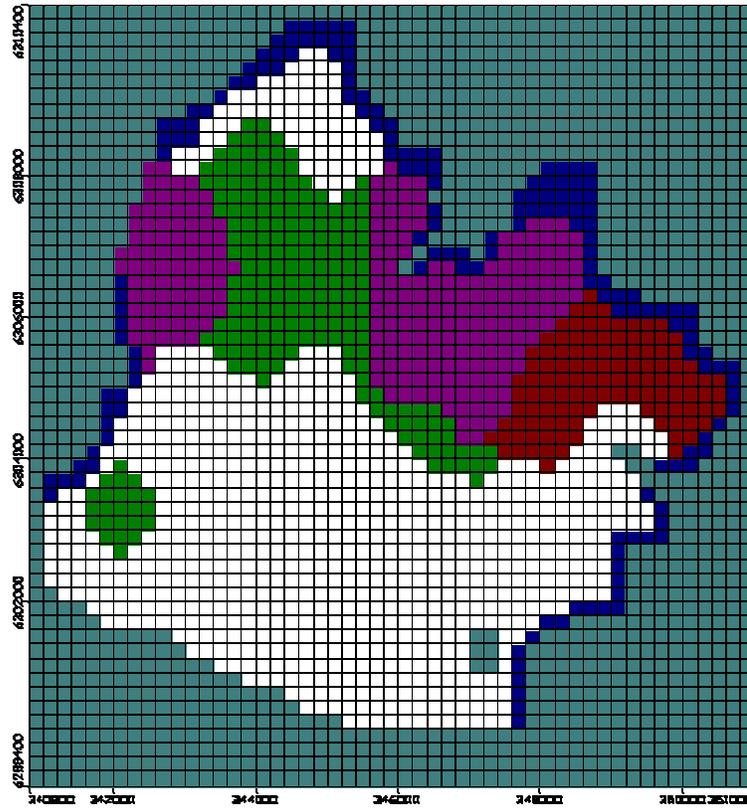
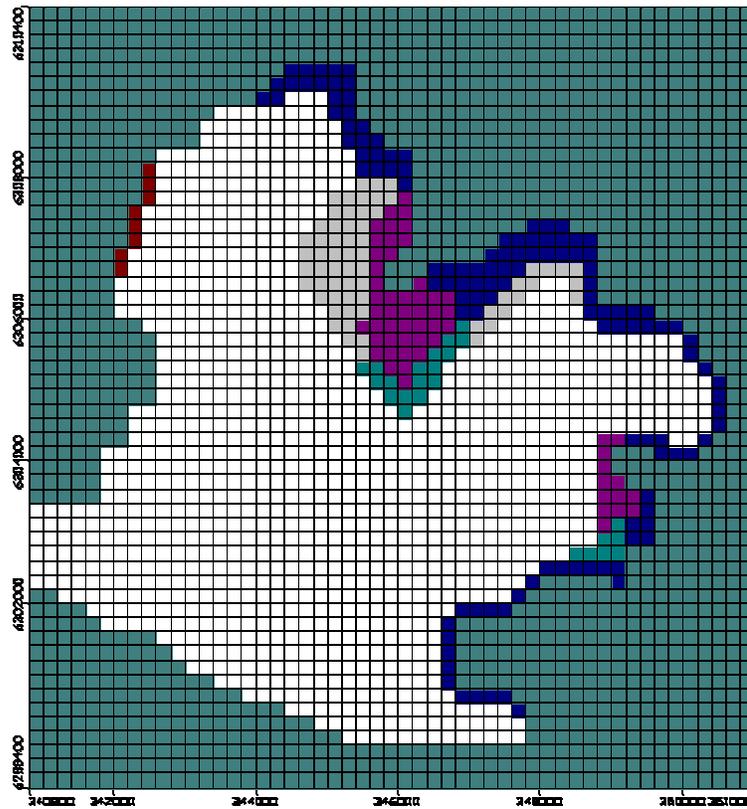


Figura 3.5
Zona Propiedades Acuífero Segunda Capa o Estrato



3.3.4 Recargas y descargas

Las recargas y descargas a las que está afecto el acuífero fueron estimadas en el Capítulo 2, por lo que en este capítulo se indican la metodología de su implementación.

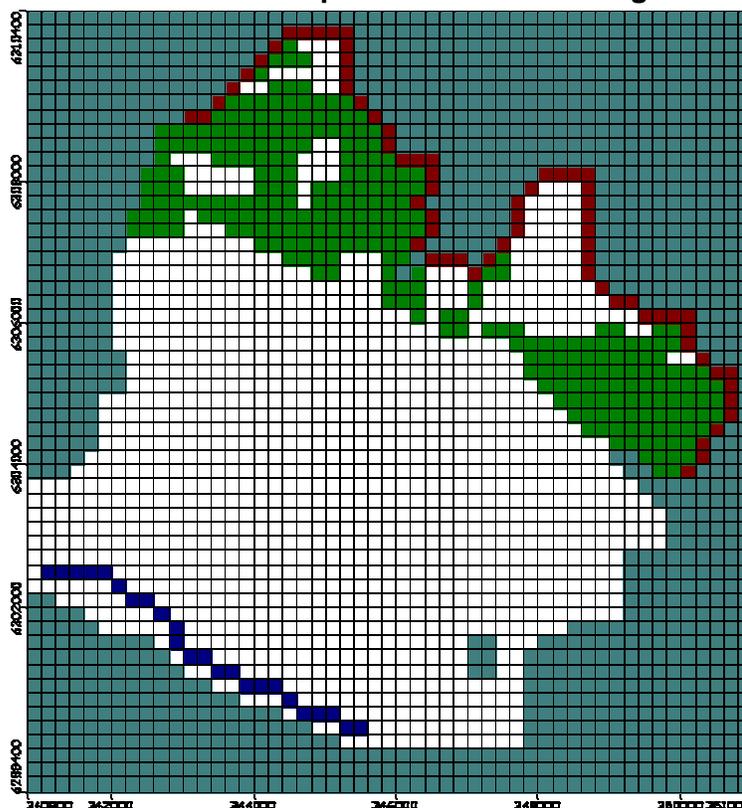
3.3.4.1 Recargas

Las recargas consideradas en el balance hídrico se dividen en 4 zonas, en las que inciden las infiltraciones que se indican en la Tabla 3.2y se presentan gráficamente en la Figura 3.6.

Tabla 3.2
Zonas de Recarga

Zona N°	Color Vmod	Descripción	Recargas
1		Zona urbana	Precipitación urbana, pérdida de red de agua potable aguas servidas.
2		Río Mapocho	Infiltración río Mapocho
3		Zona no urbana	Precipitación no urbana, regadío predial.
4		Canal El Carmen	Infiltración canal El Carmen

Figura 3.6
Distribución Espacial Zonas de Recarga



Producto de la discretización en celdas de 200 x 200 m de la zona en estudio, las superficies en el modelo no coinciden con las consideradas en el balance hídrico. En la Tabla 3.3 se comparan las superficies del balance y del modelo.

Tabla 3.3
Comparación de Superficies Sistema Real – Modelo

Zona Nº	Color VMod	Descripción	Superficie Balance	Superficie Modelo	
				Nº Celdas	Superficie
1		Zona urbana	45.93	1161	46.44
2		Río Mapocho	0.135	24	0.96
3		Zona no urbana	13.38	346	13.84
4		Canal El Carmen	0.045	70	2.8

La diferencia de superficies de las zonas urbana y no urbana, corresponde a 0.51 há y 0.46 há respectivamente. Estos valores están dentro del rango de error esperados, al definir las zonas de la fotografía aérea.

Dado que la discretización de la malla define el ancho mínimo (200 m) a ser representado en el modelo, las superficies que abarcan las fuentes longitudinales son considerablemente mayores a las consideradas en el balance. Por ello los valores de infiltración del río Mapocho y del canal El Carmen deberán corregirse, disminuyendo su valor en la misma proporción en que están el ancho real y el ancho de las celdas en el modelo. Luego la infiltración ingresada al modelo para contrarrestar el efecto de la discretización espacial es:

$$I_{\text{modelo}} = \frac{I \cdot b}{b_{\text{modelo}}}$$

Donde,

- I_{modelo} : infiltración a ingresar al modelo
- I : infiltración calculada en el balance
- b : ancho real del cauce
- b_{modelo} : ancho celdas del modelo

Dado que la discretización temporal es de un mes, el valor de las recarga permanece constante durante cada período mensual.

3.3.4.2 Descargas

Al modelo se le ingresan los pozos que presenten bombeo en los respectivos períodos de calibración y validación que se detallan más adelante en los acápite 3.4.4d) y 3.4.3d). Para ello se implementa una rutina en Visual Basic para generar el archivo que contiene la información de pozos requerida por Visual Modflow. Esta información se refiere a: identificación del pozo, su ubicación, las cotas de superficie y fondo del modelo en la ubicación del pozo, las cotas de las cribas y los regímenes de bombeo.

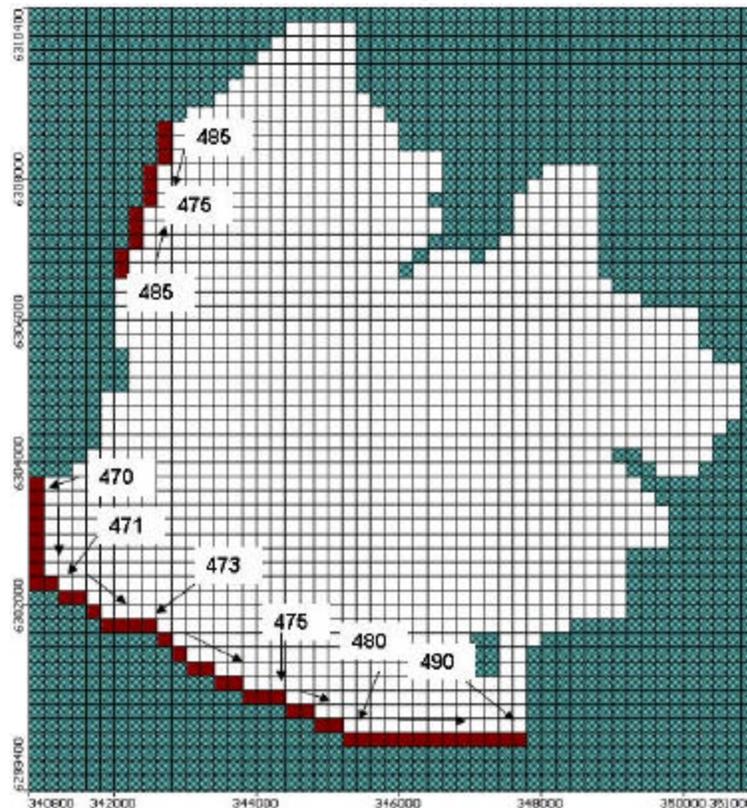
Para que el modelo ajuste automáticamente la cota de superficie y fondo en la ubicación de los pozos se le ingresan cotas extremas; 700 m para el tope y 10 m para el fondo. No se cuenta con información de cribas de los pozos particulares y de algunos de Aguas Andinas, por lo que en estos casos se ha supuesto que los pozos pinchan ambos estratos, estableciendo cribas desde los 9.99 m de profundidad hasta los 99.99 m.

3.3.4.3 Condición de borde

Se implementan dos condiciones de borde del tipo carga constante para separar el AZNS con el resto de la cuenca de Santiago. La primera se implementa en el borde nor-poniente del área de estudio, entre la puntilla de Lo Ruiz y los cerros de Renca. La segunda, se establece en el límite sur por el río Mapocho y entre éste y los cerros de Renca, tal como se aprecia en la Figura 3.7.

En ella también se indican los valores de las cargas constantes, establecidas a partir de la información de niveles existentes.

Figura 3.7
Condición de Borde de Carga Conocida (m.s.n.m)



Dada la estabilidad de los niveles estáticos en todo el período de estudio (1997 a 2003), esta condición de borde se utiliza tanto en la calibración en régimen permanente como en el transiente.

3.4 Calibración

3.4.1 Aspectos generales

La calibración tiene por objeto contrastar las respuestas del modelo construido con las condiciones observables en terreno. En ella se ajustan los parámetros de conductividad (K) y almacenamientos (S) para un determinado período, de modo de representar con el modelo las equipotenciales observadas. Las recargas, descargas y condiciones de borde se consideran como “inputs” del modelo.

3.4.2 Régimen permanente

El objeto de la calibración en régimen permanente es obtener una aproximación del valor de las conductividades (K) de cada zona definida en el modelo, para facilitar la posterior calibración en régimen transiente.

Como se indica en la ecuación de flujo, en régimen permanente (invariante en el tiempo), el modelo se independiza del almacenamiento (S), siendo la conductividad (K) el único parámetro de interés.

$$K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \Rightarrow \text{Flujo} = f(K_x, K_y, K_z) \quad (3.2)$$

Esto, sumado a que los tiempos de ejecución del modelo en este régimen son menores que en régimen transiente (depende del modelo: nº capas, discretización, nº períodos) permite al modelador obtener las conductividades en forma rápida.

Para obtener una buena estimación de la conductividad (K), se debe elegir muy bien el período que se utilice en la calibración. Lo ideal es un período en que los parámetros relevantes (recargas, descargas, niveles estáticos) sean conocidos y permanezcan inalterados (constantes) para asegurar un mejor ajuste de los niveles piezométricos. Contrariamente, si los valores de las recargas varían en el período, no se obtendrán equipotenciales representativas de éste, obteniendo una mala estimación del valor de la conductividad. Lo recomendado es que al período que se elija le anteceda también uno de condiciones similares, para garantizar la condición permanente.

3.4.2.1 Período de calibración

En vista de lo discutido anteriormente, para la calibración en régimen permanente se ha escogido el año 1998 por las siguientes razones:

- A partir de 1996 se ha observado una estabilización de los niveles estáticos, por lo que durante 1998 el acuífero ha permanecido con los niveles estables.
- En 1998 han cesado de bombear un gran número de pozos, eliminando la incertidumbre del valor de sus extracciones.
- Este año presenta la mayor información de niveles estáticos, contando con una buena distribución espacial de éstos.

3.4.2.2 Propiedades

Se adoptan las mismas zonas de propiedades, con sus respectivas conductividades y almacenamientos, descritas en el acápite 3.3.3.

3.4.2.3 Recarga

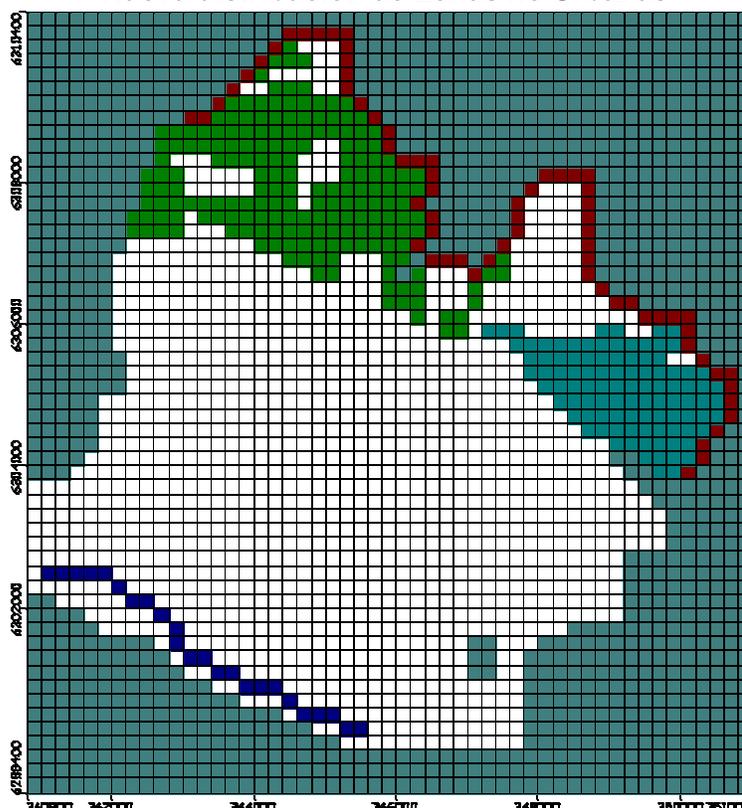
Del balance hídrico se toma el promedio anual de 1998 de las infiltraciones mensuales para cada zona. Éstas se presentan en la Tabla 3.4.

Inicialmente se estableció una sola zona no urbana de recarga, en la cual se distribuyó homogéneamente la infiltración por regadío. Sin embargo, luego de realizar la calibración se descubrió una mayor infiltración en el sector no urbanizado del sector de la Pirámide; al notar que los niveles calculados estaban por debajo de los observados. Por ello se distribuyó las extracciones del canal El Carmen a las zonas correspondientes, definiendo dos zonas no urbanas, tal como se indica en la Figura 3.8.

Tabla 3.4
Recargas para Calibración Régimen Permanente en mm/año

Zona N°	Color VMod	Descripción	Inf Total	PP	Pérdida AP-AS	Reg. Predial	Mapocho	El Carmen
1		Zona Urbana	98	9.2	88.3	0	0	0
2		Río Mapocho	4730	0	0	0	4730	0
3		Zona no Urbana 2	260	55	0	205	0	0
4		Zona no Urbana 1	367	55	0	312	0	0
5		Canal El Carmen	843	0	0	0	0	843

Figura 3.8
Nueva distribución de Zonas no Urbanas



3.4.2.4 Descargas

Se consideran las extracciones anuales de los pozos particulares operativos en 1998 y las extracciones anuales registradas en el año 2003 para los pozos de Aguas Andinas. Esto, dado que no existen registros de explotación en 1998 para estos últimos. En esto se supone el mismo régimen de extracción que para 2003, año con información considerado como confiable por Aguas Andinas. Los detalles de los pozos de bombeo y sus respectivos volúmenes de extracción se muestran en las Tablas 3.5 y 3.6. En la Figura 3.9 se aprecia la distribución espacial de los pozos.

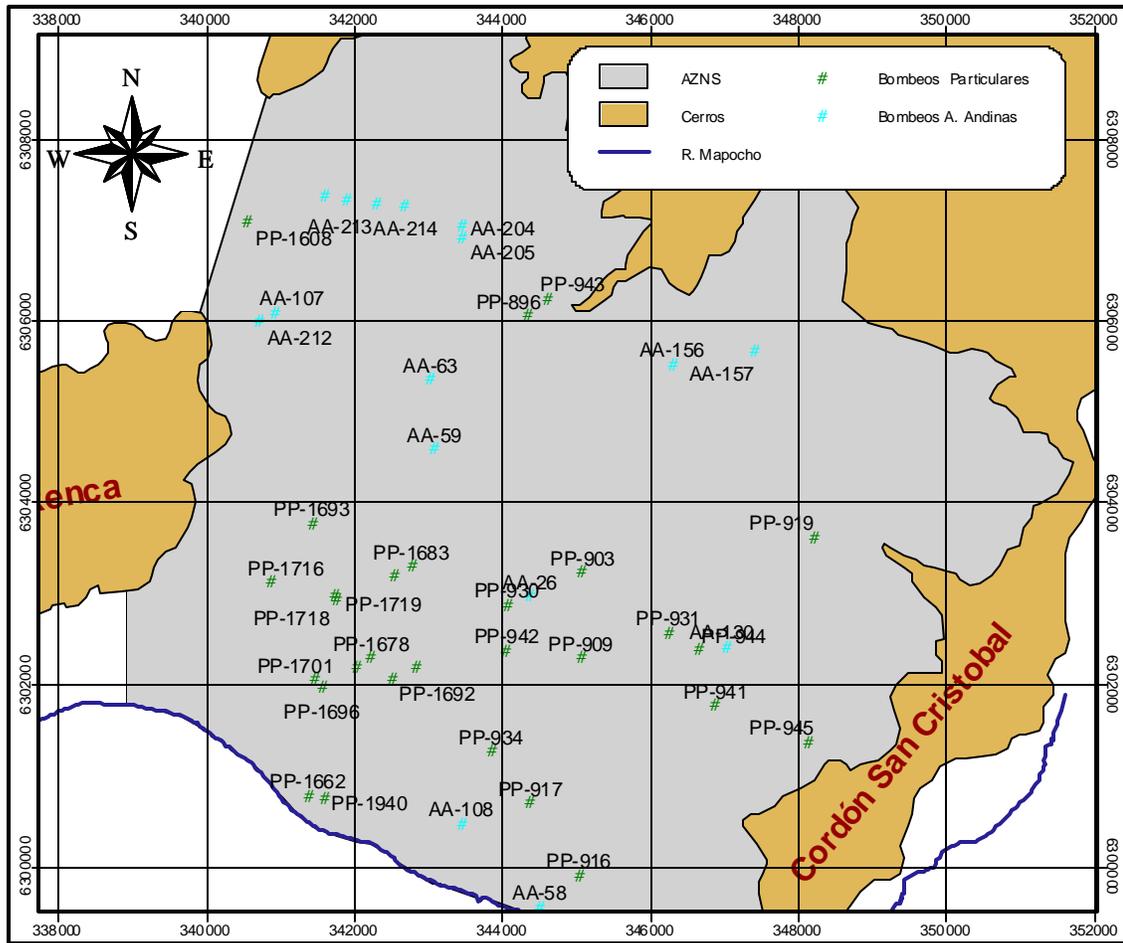
Tabla 3.5
Pozos Particulares de Extracción - Calibración Régimen Permanente

Código	Nombre	Este [m]	Norte [m]	Z Botm [m]	Z Top [m]	Cota Criba Btm [m]	Cota Criba Top [m]	Caudal [m ³ /día]
PP-896	Wenco S.A.	345,410	6,306,540	10	700	492.81	402.9	-454.5
PP-903	Batallón Intendencia N° 2	345,980	6,303,890	10	700	506.21	416.3	-11.2
PP-909	Unión Española	345,975	6,303,010	10	700	514.71	424.8	-28.4
PP-917	Rifino Melero S.A.	345,440	6,301,520	10	700	525.51	435.6	-639.1
PP-919	Cementerio Israelita	348,370	6,304,250	10	700	501.21	411.3	-319.6
PP-930	Barcel Chile S.A.	345,210	6,303,550	10	700	505.01	415.1	-272.7
PP-931	Pinturas Ceresita SAC	346,865	6,303,270	10	700	515.61	425.7	-81.8
PP-934	Textil Ergas	345,040	6,302,050	10	700	516.61	426.7	-125.0
PP-941	Calzados Beltrán Ilharreborde	347,340	6,302,520	10	700	522.51	432.6	-946.8
PP-942	Hipódromo Chile	345,200	6,303,080	10	700	508.51	418.6	-167.8
PP-943	Wenco S.A.	345,630	6,306,710	10	700	493.01	403.1	-17.0
PP-944	Hilandería Mousa	347,190	6,303,090	10	700	514.01	424.1	-159.8
PP-945	Yisus Cía. Textil	348,300	6,302,140	10	463	526.41	436.5	-397.7
PP-1662	Central Renca	343,160	6,301,590	10	700	502.21	412.3	-18.8
PP-1678	Curtiembre Etalfa	343,810	6,303,010	10	700	501.81	411.9	-59.7
PP-1683	Page y Compañía	344,220	6,303,950	10	700	498.51	408.6	-1,349.3
PP-1692	Interam. Comecia Ltda.	344,020	6,302,800	10	700	505.61	415.7	-2.4
PP-1696	Hilandería Renca S.A.	343,315	6,302,700	10	700	499.81	409.9	-3,076.3
PP-1701	Hilandería Renca S.A.	343,230	6,302,790	10	700	499.11	409.2	-2,837.7
PP-1716	Química Souyet	342,780	6,303,800	10	700	496.21	406.3	-22.7
PP-1718	Conservas Perello	343,430	6,303,660	10	700	599.21	509.3	-159.8
PP-1719	Cía. de Tejidos Prímatex S.A.	343,460	6,303,610	10	700	499.21	409.3	-590.8
PP-1720	Inacap	343,660	6,302,910	10	700	500.61	410.7	-1,227.1
PP-1721	Aldo Colombo y Cía Ltda.	344,285	6,302,900	10	700	506.51	416.6	-204.5
PP-1940	Gener Eléctrica Santiago	343,320	6,301,555	10	700	502.51	412.6	-30.0
PP-916	Fca. Caballo Blanco	345,950	6,300,770	10	700	535.21	445.3	-170.6
PP-1608	DOS 42	342,540	6,307,500	10	700	483.71	393.8	-63.9
PP-1693	SOGESE	343,200	6,304,400	10	700	495.01	405.1	-255.6
PP-1708	Edmundo Thomas	344,050	6,303,850	10	700	498.51	408.6	-357.9

Tabla 3.6
Pozos Extracción Aguas Andinas, Calibración Régimen Permanente

Código	Nombre	Este [m]	Norte [m]	Z Botm [m]	Z Top [m]	Cota Criba Btm [m]	Cota Criba Top [m]	1998 [m ³ /día]
AA-204	Huechuraba 7	344,750	6,307,471	10	700	481.4	397.4	-1,303.7
AA-214	Huechuraba 5	344,164	6,307,671	10	700	444	378	-692.0
AA-213	Huechuraba 4	343,857	6,307,704	10	700	451	417	-1,018.9
AA-205	Huechuraba 8	344,750	6,307,335	10	700	448.9	354.9	-876.9
AA-208	Huechuraba 3	343,560	6,307,742	10	700	432	353	-335.6
AA-209	Huechuraba 2	343,340	6,307,762	10	700	443	361	-2,145.0
AA-107	Huamachuco 5	342,809	6,306,562	10	700	483	384	-4,612.2
AA-212	Huamachuco 2A	342,656	6,306,478	10	700	431	377	-1,193.6
AA-59	El Carmen	344,460	6,305,162	10	700	490	438	-1,207.8
AA-63	J. Aguirre 3	344,415	6,305,878	10	700	477.8	424.8	-498.0
AA-156	Santa Victoria 2	346,901	6,306,030	10	700	469	426	-707.7
AA-157	El Esfuerzo 1	347,754	6,306,183	10	700	499	418	-2,154.8
AA-26	Perez Cotapo 1	345,442	6,303,647	10	700	445.79	437.6	-778.0
AA-130	Quinta Bella 2	347,454	6,303,121	10	700	486.5	436.5	-85.2
AA-108	J.A.R. 1-2	344,735	6,301,307	10	700	472	411	-2,026.7
AA-58	Villa Ríos	345,540	6,300,440	10	700	527.4	463.4	-339.6

Figura 3.9
Distribución Pozos de Bombeo, Régimen Permanente



Fuente: AC (2000), Aguas Andinas.

3.4.2.5 Condición de borde e inicial

Se considera la misma condición de borde descrita en el acápite 3.3.5. Como condición de partida de la simulación, se establece un nivel de 510 m. para todo el acuífero, de esta forma todas las celdas se encuentran húmedas al iniciar los cálculos, ajustando el modelo el nivel piezométrico correspondiente a las condiciones de recarga y descarga ingresadas.

3.4.2.6 Pozos de observación

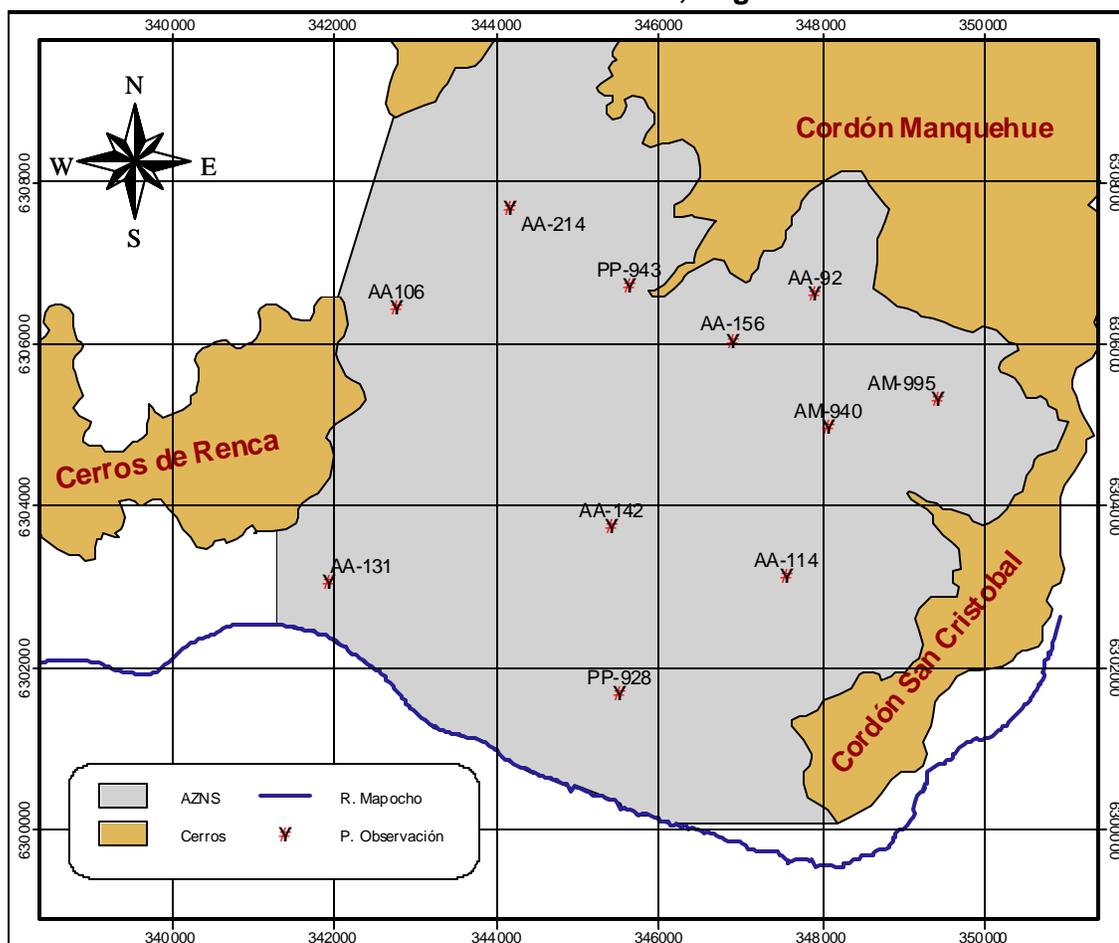
Dado el gran número de pozos con información para el año 1998, se cuenta con una buena distribución espacial de niveles estáticos en todo el AZNS. Sin embargo se utilizó el pozo AA-204 Huechuraba con información de niveles del 2003 para completar la red de pozos de observación. La ubicación de éstos se presenta en la Figura 3.10.

3.4.2.7 Parámetros finales

Tal como se ha discutido, el parámetro relevante en la calibración en régimen permanente es la conductividad definida inicialmente en las distintas zonas, cuyos valores y distribuciones han sufrido modificaciones en el transcurso de la calibración. En la Tabla 3.7 se presenta los valores de las conductividades finales, comparándola con las iniciales, en tanto que en la Figura 3.11 se

aprecia su distribución. Las zonas de propiedades de la segunda capa no sufrieron modificación.

Figura 3.10
Distribución de Pozos de Observación, Régimen Permanente

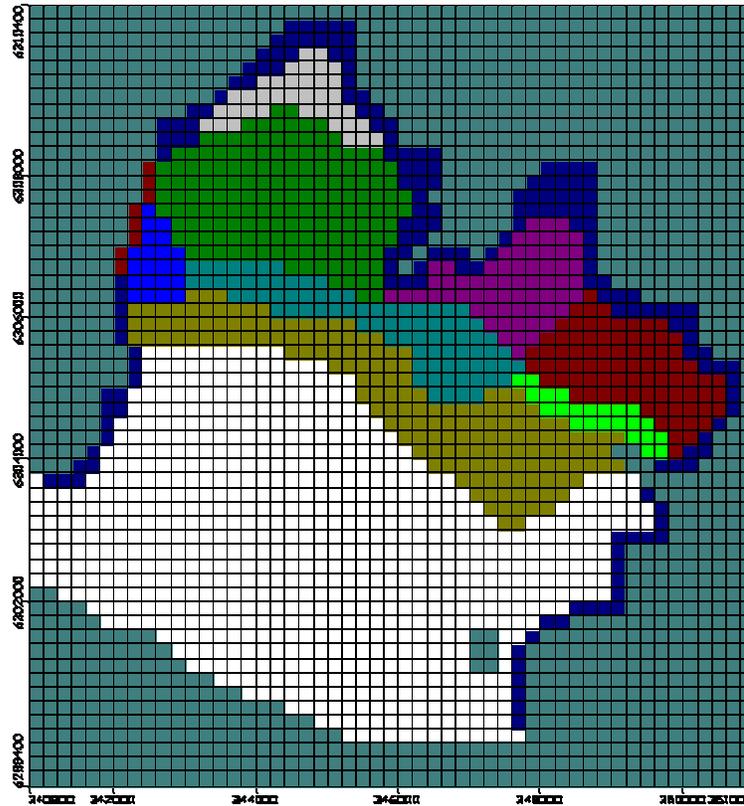


Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.7
Conductividades luego de la calibración régimen permanente

Zona N°	Color Vmod	Estimación		Resultado	
		Kx=Ky [m/día]	Kz [m/día]	Kx=Ky [m/día]	Kz [m/día]
1		80	8	65	6.5
2		50	5	10	1
3		20	2	0.02	0.002
4		-	-	0.08	0.008
5		1	0.1	0.009	0.0009
6		10	1	0.015	0.0015
7		-	-	0.025	0.0025
8		-	-	0.1	0.01
9		-	-	1	0.1
10		-	-	0.01	0.001
11		-	-	0.012	0.0012

Figura 3.11
Zona propiedades, Calibración Régimen Permanente



En esta calibración se han utilizado los valores $S_s=0.01$ y $S_y=0.10$ para el almacenamiento.

3.4.2.8 Ajuste de niveles

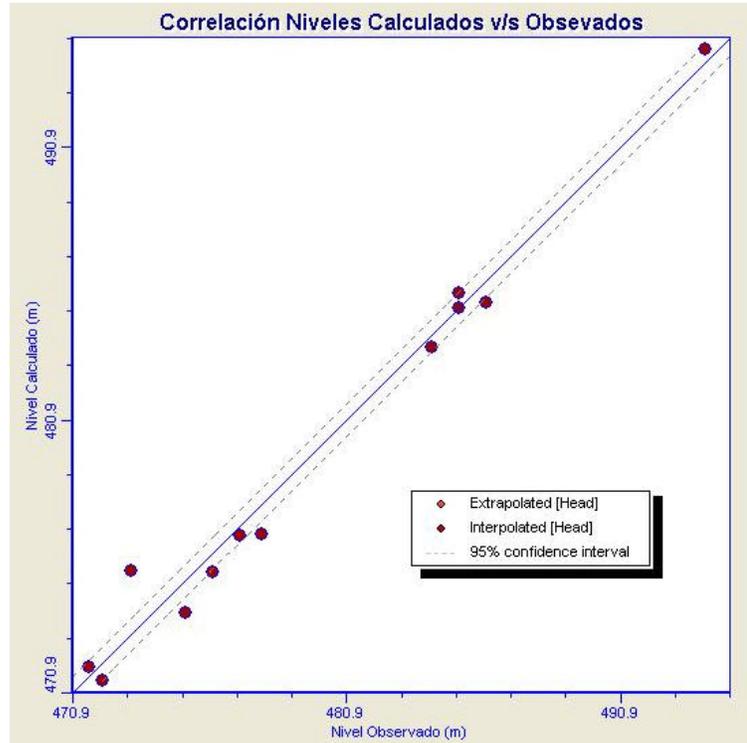
La distribución de las distintas zonas de conductividades, así como el valor de éstas obtenidas en la calibración, determinan los niveles simulados. En la Figura 3.12 se observa gráficamente la correlación entre los niveles calculados y los observados en el año 1998. Se observa un buen ajuste, escapando de la tendencia general el pozo Molino La Estampa PP-928 que se encuentra influenciado por la condición de borde establecida por el río Mapocho. Cabe destacar que ésta se estableció observando la tendencia general de los niveles estáticos, pudiendo por ello no coincidir con los niveles en ciertos puntos particulares.

En la Tabla 3.8 se presentan los estimadores estadísticos de la calibración. Si bien se observan errores absolutos del orden de 1 m, la información de topografía de curvas de nivel cada 5 m no permite un nivel de precisión menor a 3 m.

Tabla 3.8
Estimadores Estadísticos de la Calibración en Régimen Permanente

Estimador	Valor
Nº Puntos (Pozos)	11
Promedio de error	-0.24 (m)
Promedio error absoluto	0.55 (m)
Erros Estandard	0.20 (m)
RMS	0.68 (m)
RMS normalizado	2.8%

Figura 3.12
Correlación Niveles Calculados v/s Observados, Régimen Permanente



Fuente: salida Visual Modflow.

Cabe recordar que la calibración en régimen permanente tiene por objeto obtener una buena estimación de las conductividades en el acuífero, para facilitar el ajuste de niveles en la calibración en régimen transiente.

3.4.3 Régimen Transiente

3.4.3.1 Período de calibración

Inicialmente se pretendía realizar la calibración de 1988 a 1997 y la validación de 1998 a 2003. Sin embargo, luego del análisis de los niveles estáticos que evidenciaban notorios descensos que se estabilizan a partir de 1997, se decidió calibrar el modelo a partir de este último año al 2000. De esta forma (condición transiente, pero estable) la calibración representará de forma más fidedigna las condiciones del acuífero, ya que se evita la incertidumbre de extrapolar los descensos en la condición de borde establecida por el río Mapocho.

3.4.3.2 Propiedades

Se adoptan las mismas zonas de propiedades obtenidas de la calibración permanente con sus respectivos valores (acápite 3.4.2.7). Aquí, en la calibración transiente se determinarán la capacidad específica (S_y) y el almacenamiento específico (S_s) de mejor ajuste. Inicialmente se utiliza $S_y=0.1$ y $S_s=0.001[1/m]$.

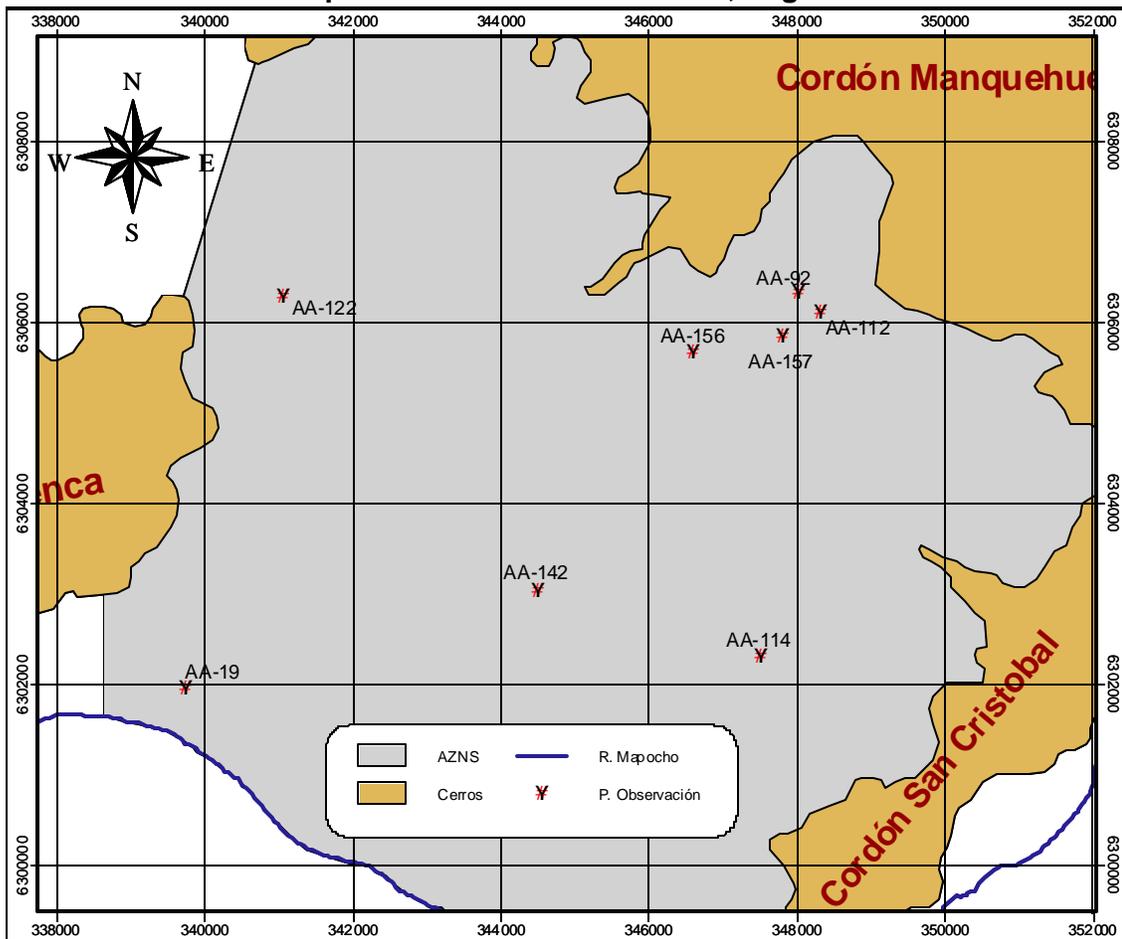
3.4.3.5 Condición de borde e inicial

Se considera la misma condición de borde descrita en el acápite 3.3.5. Como condición inicial de niveles, se adopta los niveles piezométricos resultantes de la calibración en régimen permanente de 1998, aumentando éstos en dos metros, para que concordasen con los niveles de 1997. Adicionalmente se modifica los niveles en los sectores donde el ajuste del aumento de los dos metros no fue suficiente para representar las condiciones de niveles de 1997.

3.4.3.6 Pozos de observación

Luego de un análisis de la distribución temporal de información de niveles estáticos de cada pozo, se eligen los que presentan información en al menos 2 de los cuatro años de calibración o que tengan más de 15 registros de niveles. En los sectores donde más de un pozo califique como de observación bajo el criterio antes descrito, se eligió el con mayor información de niveles. La ubicación de los pozos de observación se presenta en la Figura 3.14.

Figura 3.14
Distribución Espacial Pozos de Observación, Régimen Transiente



Fuente: elaboración propia.

3.4.3.7 Parámetros Finales

Si bien los valores de las conductividades de las distintas zonas se establecieron en la calibración en régimen permanente, se han modificado, para que los niveles calculados se ajusten mejor a los observados. Cabe destacar, que en esta calibración no se ha modificado la distribución de zonas de distinta conductividad resultante de la calibración permanente. En la Tabla 3.9 se comparan las conductividades resultantes de la calibración permanente y los aquí obtenidos.

Tabla 3.9
Comparación Parámetros Obtenidos

Zona Nº	Color Vmod	Calibración Permanente		Calibración Transiente	
		Kx=Ky [m/día]	Kz [m/día]	Kx=Ky [m/día]	Kz [m/día]
1		65	6.5	70	7
2		10	1	10	1
3		0.02	0.002	0.02	0.002
4		0.08	0.008	0.1	0.01
5		0.009	0.0009	0.009	0.0009
6		0.015	0.0015	0.02	0.002
7		0.025	0.0025	0.1	0.01
8		0.1	0.01	0.1	0.01
9		1	0.1	0.1	0.1
10		0.01	0.001	0.1	0.01
11		0.012	0.0012	0.012	0.0012

Dado que no se tiene información para la calibración del almacenamiento se ajustó un solo valor en todo el acuífero tanto para el almacenamiento específico (S_s), como para la capacidad específica (S_y). De esta forma el modelo elige el almacenamiento correspondiente (S_s o S_y) dependiendo de las condiciones de confinamiento del acuífero. Utilizando el método de prueba y error, de forma de minimizar la diferencia entre los niveles calculados y observados, los valores de mejor ajuste fueron $S_s=0.0012[1/m]$ y $S_y=0.08$.

3.4.3.8 Ajuste Niveles

La distribución de las distintas zonas de propiedades con sus respectivas conductividades y almacenamientos resultantes de la calibración, determinan el resultado del cálculo de niveles. En las Figuras 3.15 a 3.17 se comparan los niveles calculados con los observados en cada pozo de observación. Se advierte que en general los niveles calculados siguen la misma tendencia que los de terreno, sin embargo en algunos períodos éstos distan de ellos, atribuyendo estas diferencias a la sesgada información de bombeos con que se cuenta y a niveles dinámicos registrados como estáticos. Es por ello que no se pudo alcanzar un RMS normalizado menor al 5%, valor típicamente adoptado como aceptable.

A pesar de ello, en promedio los niveles calculados y observados no difieren en más de 2.7 m, lo que es concordante con la precisión de la información topográfica (+/- 2.5 m). Esto se confirma al revisar los estimadores estadísticos de la correlación, en la Tabla 3.10.

Figura 3.15
Resultado Calibración, (AA-157)-(AA-114)-(AA-122)

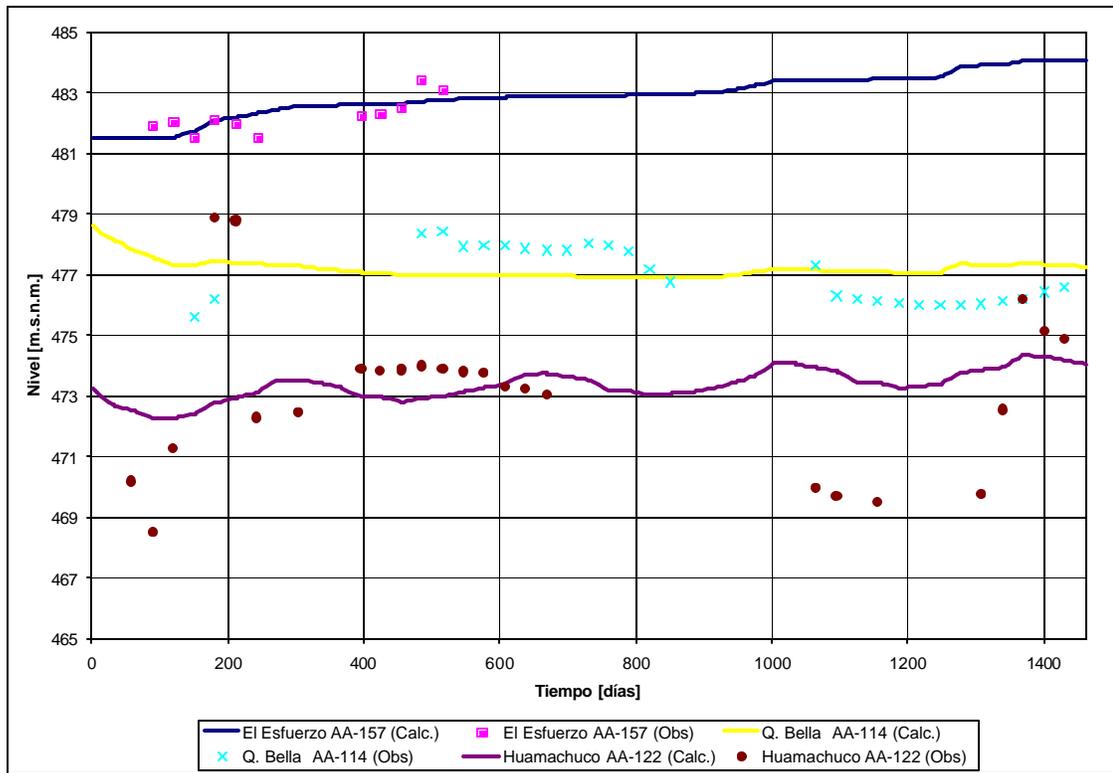


Figura 3.16
Resultado calibración, (AA-156)-(AA-142)-(AA-92)

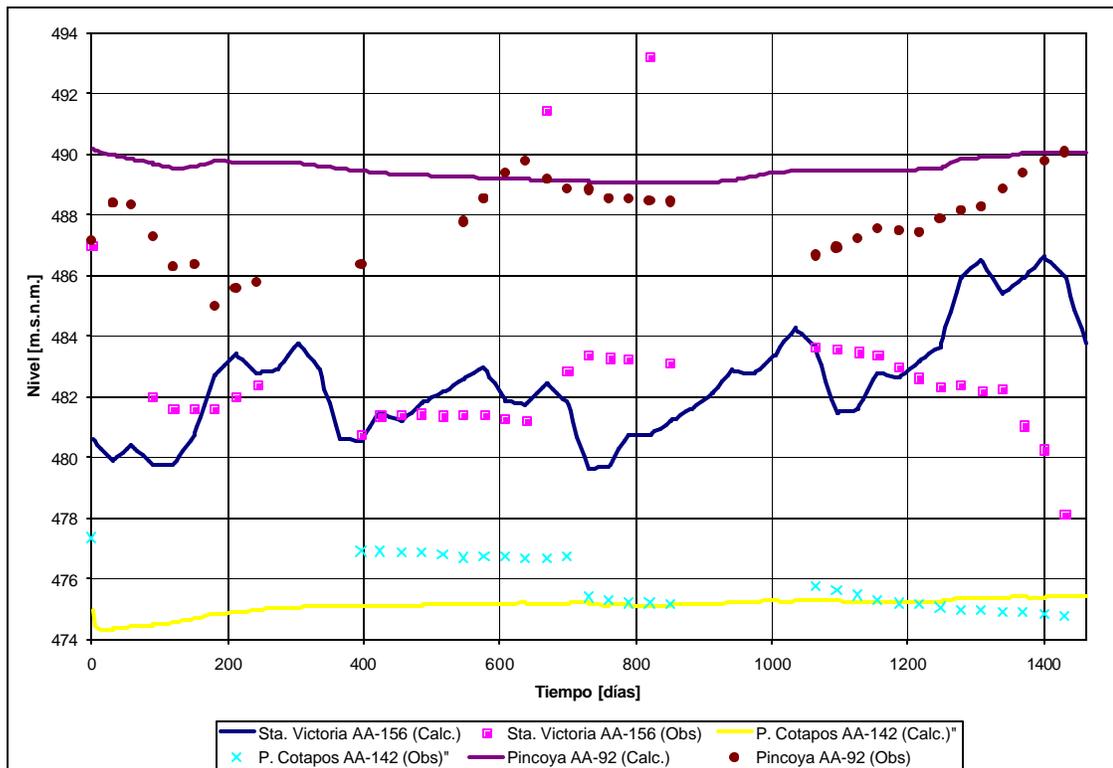


Figura 3.17
Resultado calibración, (AA-19)-(AA-112)

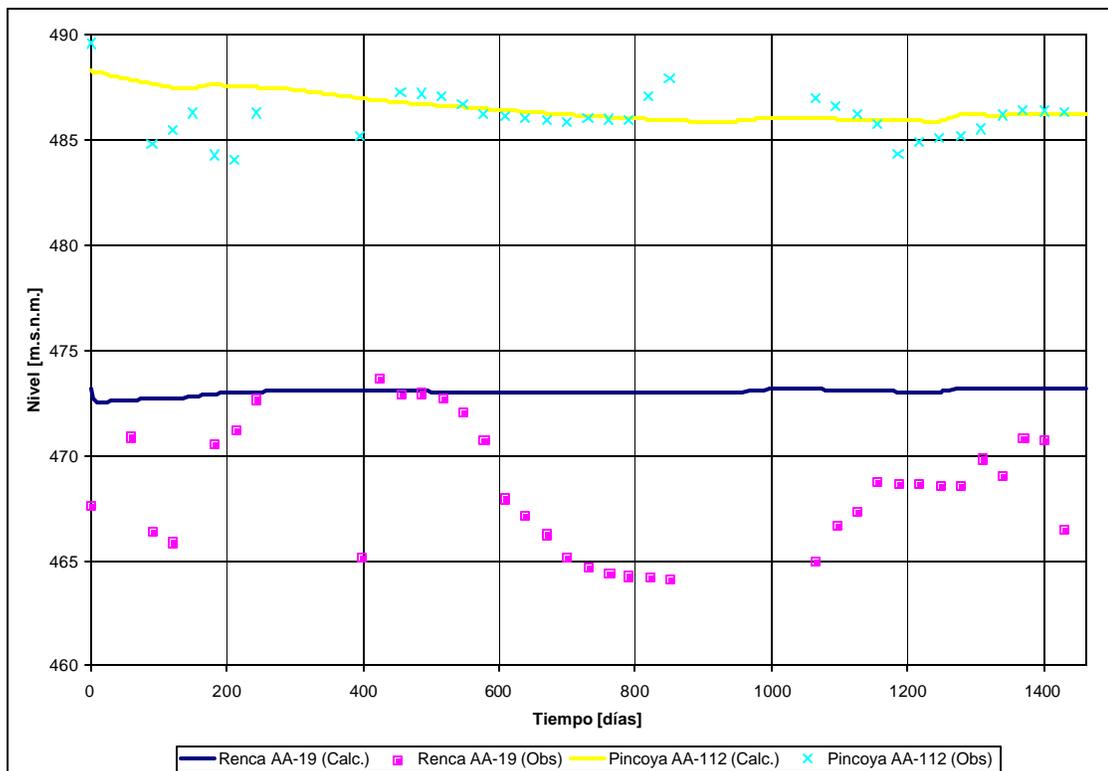


Tabla 3.10
Estimadores Estadísticos de la Calibración en Régimen Transiente

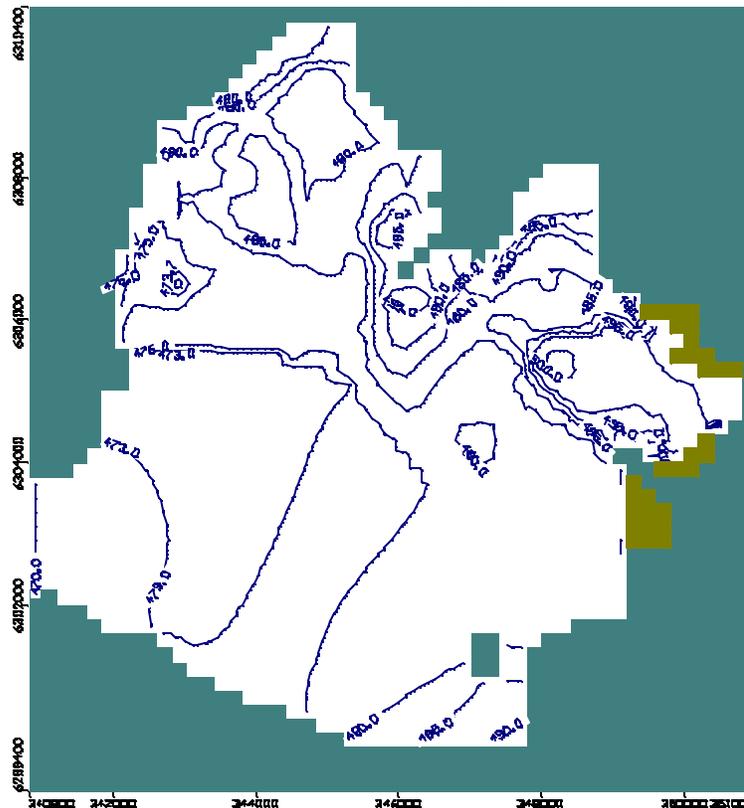
Estimador	Valor
Nº Ptos.	2340
Promedio de error	0.92 (m)
Promedio error absoluto	1.82 (m)
Error Estandar	0.05 (m)
RMS	2.74 (m)
RMS normalizado	9.4%

3.4.4 Equipotenciales

En la Figura 3.18 se observan las equipotenciales (cada 5 m) de los niveles calculados. Tal como se esperaría los gradientes hidráulicos son mayores en las zonas menos permeables, producto de la mayor pérdida de energía del flujo al viajar por estas. Se aprecia la zona de depresión de Huamachuco, donde existe una tupida batería de pozos que extraen aproximadamente el 27% del total de la producción de Aguas Andinas.

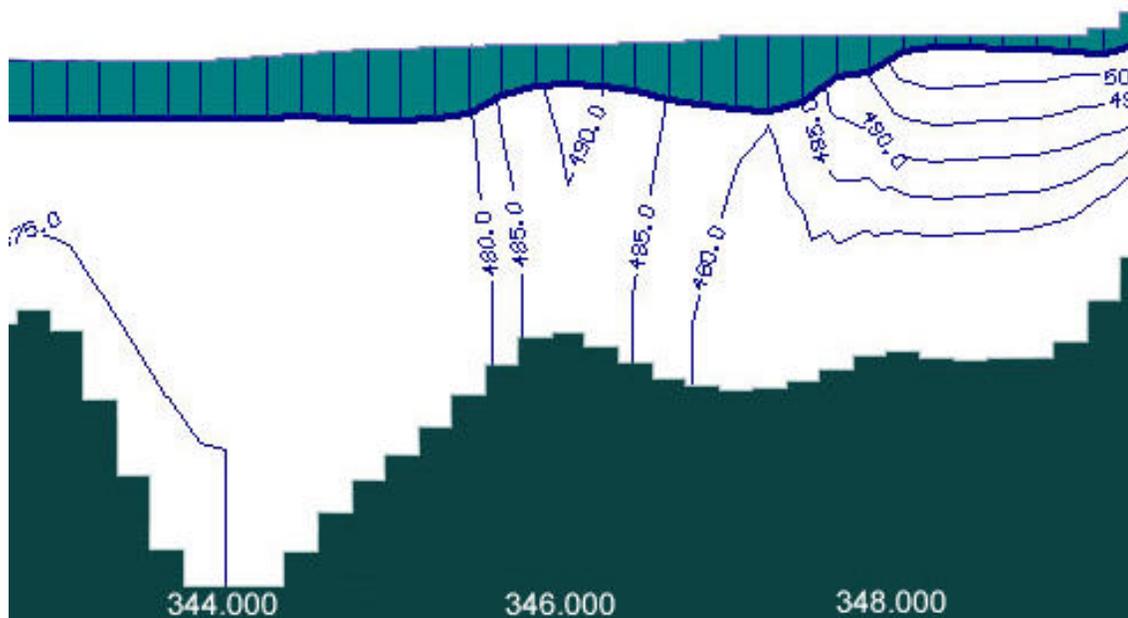
En la zona norte de Huechuraba se representan algunas zonas de niveles más bajos, producto de menores infiltraciones en sectores urbanizados sobre antiguos previos agrícolas. En tanto en la zona sur de Huechuraba, en el sector de El Salto - La Pirámide, los niveles son notoriamente mayores; alcanzando los 500 m.s.n.m; que contrastan con los del sector urbanizado adyacente de la Pincoya, con niveles del orden de los 485 m. En el sector E:346.000 y N:6.306.000 se observa un prolongación de las curvas de nivel 480-500 m. hacia el sur. Este aumento local del nivel es producido por una protuberancia basal que se presenta en la Figura 3.19

Figura 3.18
Distribución Espacial Equipotenciales



En La zona alta del este del AZNS, donde se junta el cordón de Huechuraba con el del San Cristóbal, se presentan celdas de color café amarillento representando celdas secas. Esto debido a que el nivel freático se encuentra contenido en el segundo estrato.

Figura 3.19
Protuberancia Basal (UTM N: 6,306,000 m)



3.4.5 Flujos

Tal como se aprecia en la Figura 3.20 la dirección de los flujos se encuentra influenciada por las captaciones en los sectores de menor permeabilidad (sector de Huechuraba, contiguo al cordón del mismo nombre), en tanto que en las cercanías del río Mapocho las direcciones siguen la tendencia del flujo regional, siguiendo la dirección del río Mapocho. En la Figura 3.21 muestra la dirección de los flujos en la segunda capa, constituida principalmente por materiales de mayor permeabilidad que en el primer estrato. Se aprecia la tendencia general del flujo subterráneo dentro del AZNS, bajando de nor oriente a sur poniente.

Esta última figura evidencia también que el flujo subterráneo entre los cerros de Renca y la puntilla de Lo Ruiz hacia el acuífero de Colina no es tan notorio, confirmando los comentarios del acápite 3.3.3.

En las Figuras 3.22 y 3.23 se presentan comparativamente las magnitudes de velocidades en el AZNS, observándose una fuerte entrada por el sector revestido del río Mapocho, y una fuerte salida entre éste y el cerro de Renca en ambos estratos. Se hace notoria la gran diferencia de magnitudes entre las zonas de conductividades altas y bajas.

3.4.6 Balance

Para tener una visión de las magnitudes de los flujos subterráneos que ingresan y abandonan el AZNS, se han definido 6 zonas de control, detalladas en la Tabla 3.11 y que se presentan en la Figura 3.24. En la Figura 3.25 se presenta la magnitud de los flujos a través de las zonas antes definidas. Se aprecia que el principal aporte de flujo subterráneo hace ingreso por la zona no revestida del río Mapocho y que principalmente el flujo abandona el acuífero por las zonas 4 y 5, entre el río Mapocho y el cerro de Renca. En la zona 3, existen flujos de sur a norte y viceversa, sin embargo éstos son preferentemente paralelos al río Mapocho.

Tabla 3.11
Zonas de Control de Flujos

Zona Nº	Color VMod	Descripción	Longitud [m]
1		AZNS	-
2		Tramo influenciado por el revestimiento del Mapocho	2,600
3		Tramo líneas de flujo preferentemente paralelas al Mapocho	2,600
4		Tramo líneas de flujo perpendiculares al río Mapocho	1,600
5		Salida: río Mapocho – cerros de Renca	1,600
6		Salida/Entrada: Puntilla Lo Ruiz – cerros de Renca	2,200

En la zona de control 6, apenas se evidencia flujo. Esto se explica por la presencia de arcilla en ambos estratos que actúa como tapón, dificultando los flujos. Sin embargo existe un pequeño flujo desde el acuífero ubicado al norte, producto de la depresión inducida por los bombeos en Huamachuco y Huechuraba. En las zonas de control 3 y 4, contiguas al río Mapocho, evidencian tanto ingresos como egresos, siendo mayores estos últimos. Si bien la Figura 3.25 muestra los flujos en un período determinado, la configuración general ahí presentada se mantiene por los demás, variando principalmente el valor de la recarga y las explotaciones.

Figura 3.20
Dirección de Flujo Subterránea en Primera Capa o Estrato

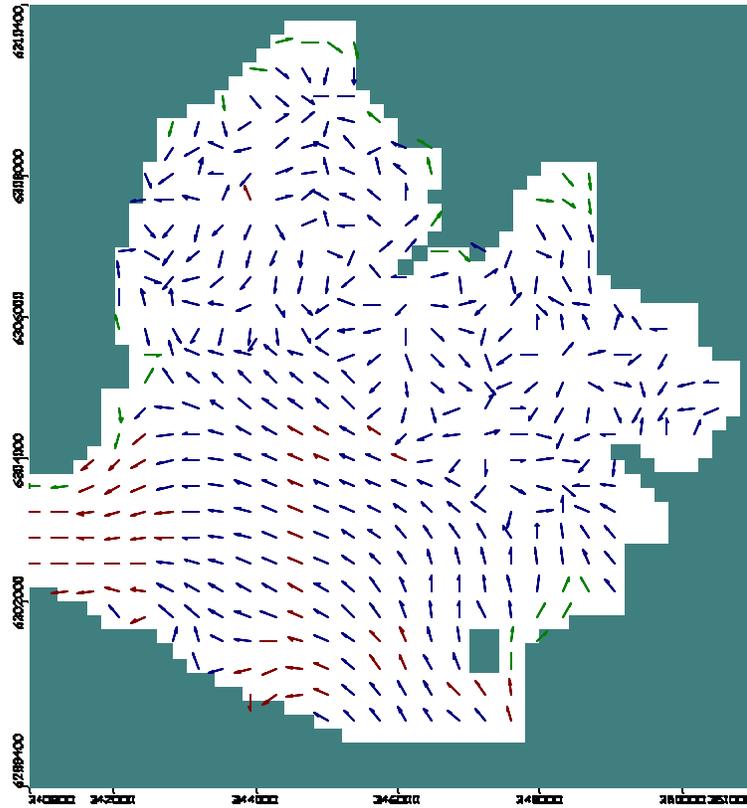


Figura 3.21
Dirección de Flujo Subterráneo en Segunda Capa o Estrato

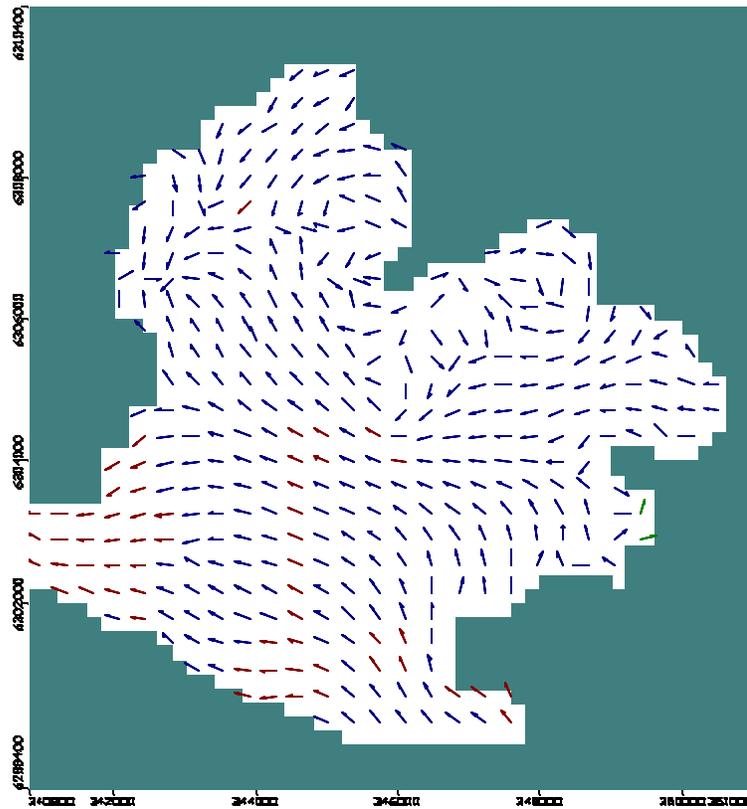


Figura 3.22
Magnitud del Flujo Subterráneo en Primera Capa o Estrato

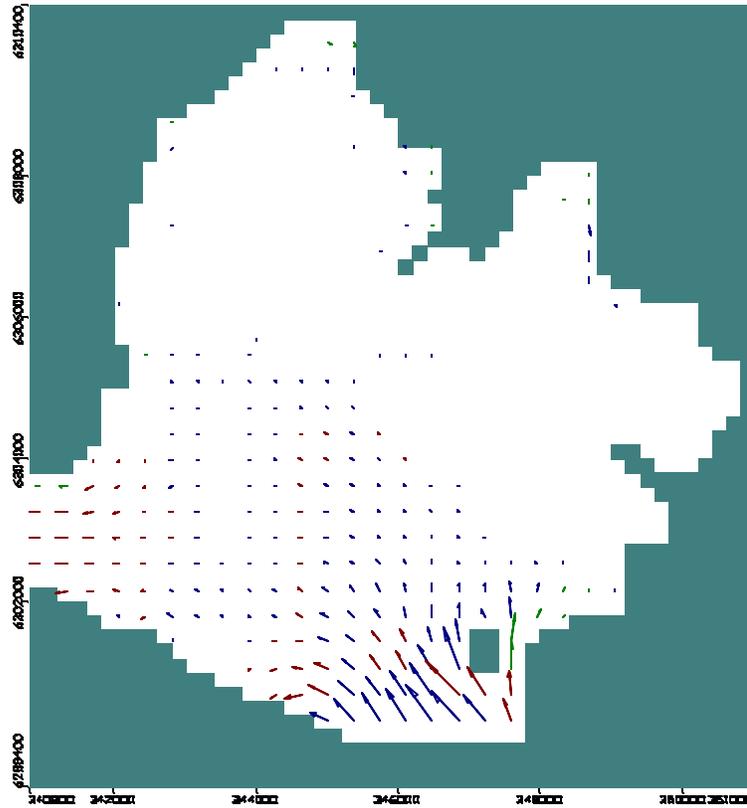


Figura 3.23
Magnitud del Flujo Subterráneo en Segunda Capa o Estrato

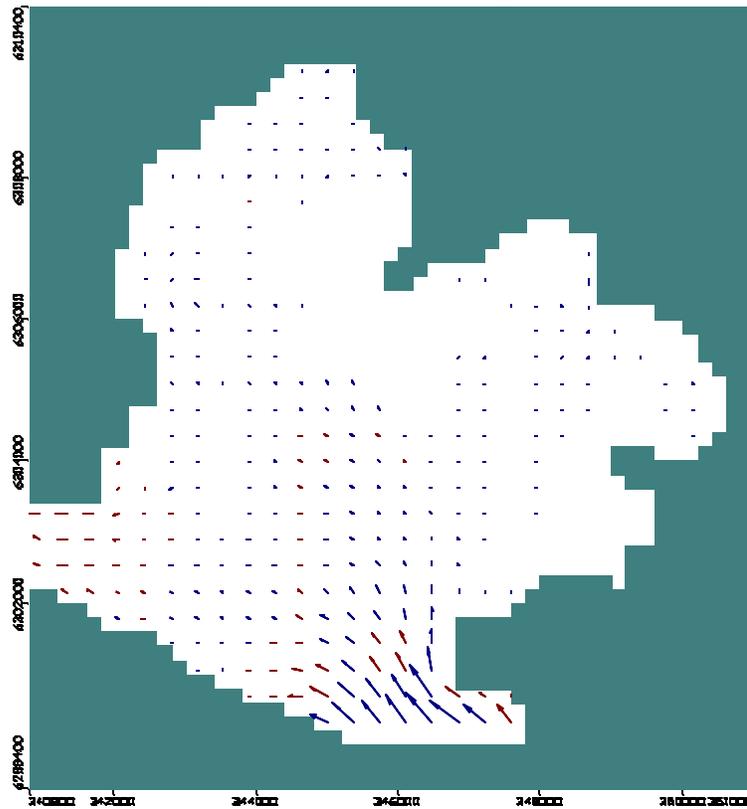


Figura 3.24
Zonas de Control de Flujos en Primera Capa o Estrato (Zone Budget)

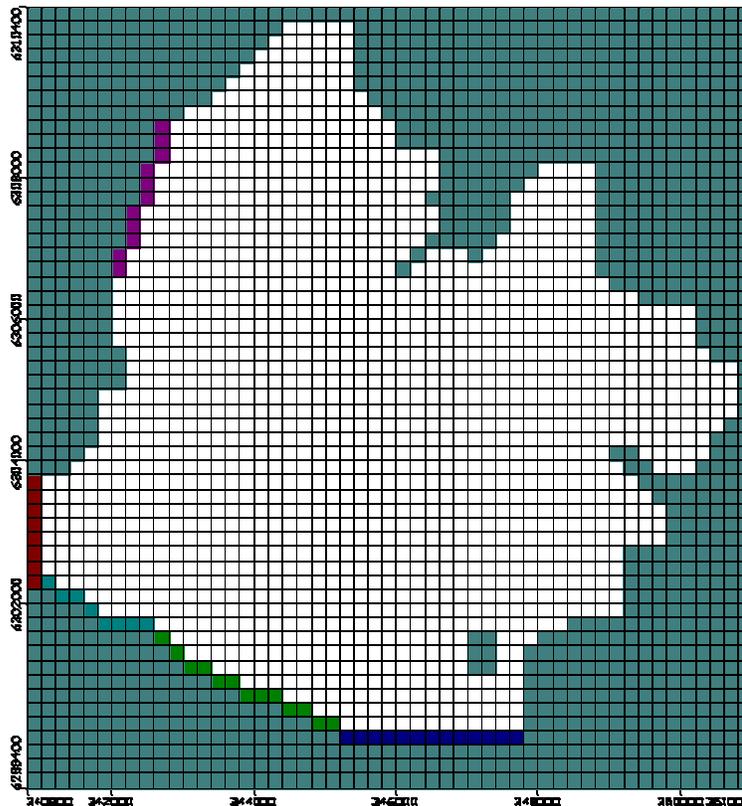
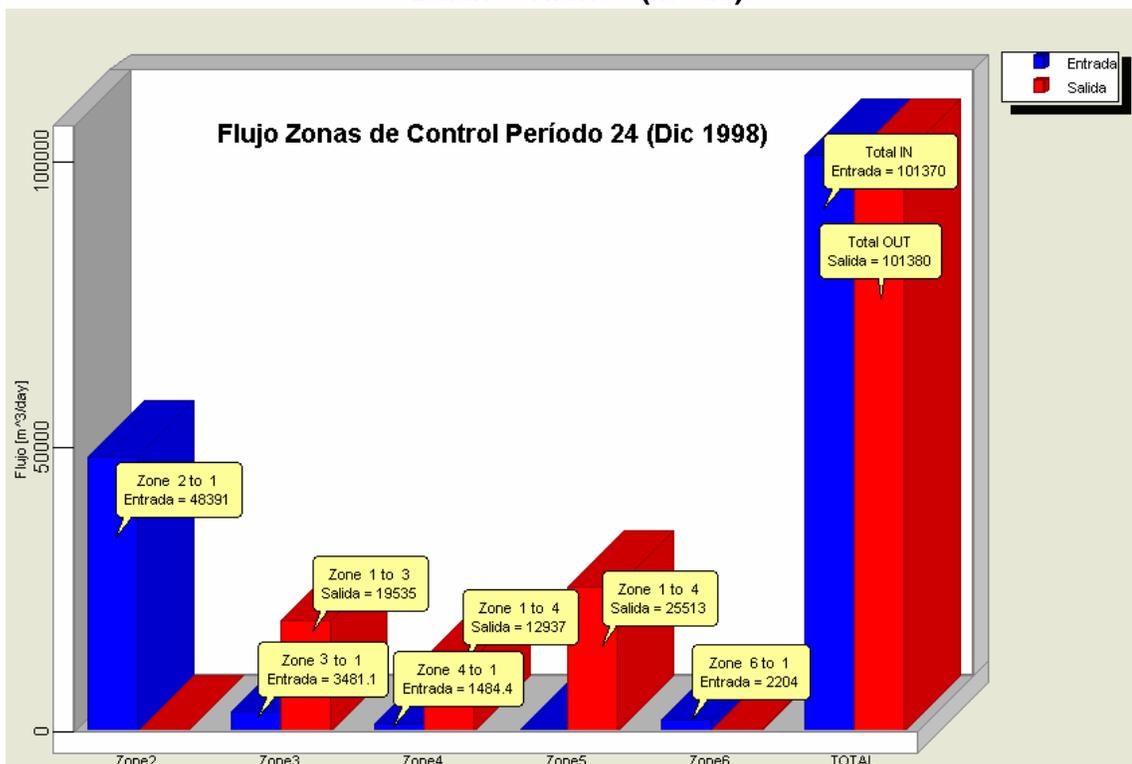


Figura 3.25
Balance Hídrico (m³/día)



3.5 Validación

La validación, como su nombre lo indica, tiene por objeto validar la calibración y por ende al modelo. Se tiene dos formas de validar el modelo. En la primera, se extiende la simulación hasta el 2003, verificando si se representan los niveles piezométricos para este nuevo período. En caso de no coincidir, se realizan los ajustes pertinentes a los parámetros de calibración. En la segunda, se comparan niveles calculados y observados utilizando pozos de observación distintos a los ya considerados en la calibración, manteniendo el período 1997-2000 de simulación.

Manteniendo las condiciones establecidas en el período de calibración (1997 a 2000) se extiende la simulación al año 2003, considerando los valores de recargas y descargas calculadas en el balance hídrico. Los regímenes de bombeo de los pozos de Aguas Andinas para la extensión (2000-2003) son los correspondientes al año 2003, período con información de bombeo considerada como confiable por Aguas Andinas. En el caso de los pozos particulares, se extiende la información de bombeos disponible en 1998.

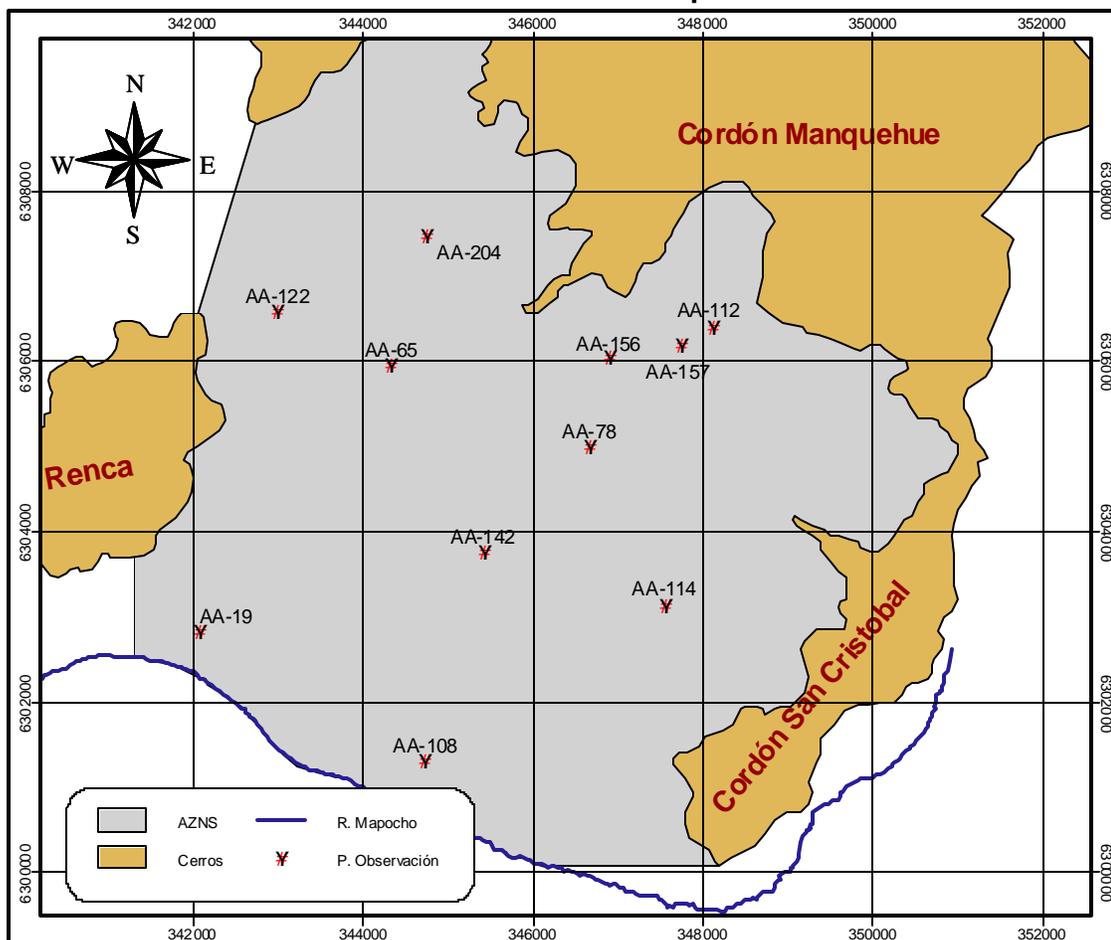
Para la comparación de niveles del período de extensión, sólo se cuenta con información del año 2003, por lo que para considerar el modelo como validado, se espera que los niveles calculados alcancen los observados en el año 2003.

Dado que todos los pozos de observación considerados en la calibración; a excepción del AA-92 (Pincoya 92); cuentan con registros en el año 2003, se utilizaron estos mismos en la validación. Para mejorar la distribución espacial de los pozos de observación se consideran también los pozos AA-204 (Huechuraba), AA-65, (Juanita Aguirre) y AA-78 (Lo Aranguiz). La ubicación de estos nuevos pozos se observa en la Figura 3.26.

En las Figuras 3.27 a 3.30 se observa que en general se representan bien los niveles del año 2003 en los pozos utilizados para la calibración, a excepción de AA-122 (Huamachuco), donde los niveles observados están por debajo de los calculados, incluso por más del error esperable de 3 m, atribuyendo esta diferencia a la sesgada información de bombeos con que se cuenta. Cabe recordar que para el período de calibración y validación se utilizó los mismos regímenes de bombeo de 2003, por no contar con mayor información. Por otro lado en la zona de Huamachuco existen varios pozos operativos con altas tasas de bombeo, por lo que los niveles observados no corresponderían necesariamente a niveles estáticos.

La Tabla 3.12 muestra los estadísticos resultantes de la validación. Comparando el RMS normalizado con el obtenido en la calibración, se tiene una mejora de 1.4 puntos porcentuales, lo que indica que los niveles calculados del 2003 se ajustan bien con los observados.

Figura 3.26
Pozos de Observación Utilizados para Validación



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.12
Estimadores Estadísticos de la Validación en Régimen Transiente

Estimador	Valor
Nº Ptos.	3234
Promedio de error	0.56 (m)
Promedio error absoluto	1.55 (m)
Error Estandard	0.04 (m)
RMS	2.33 (m)
RMS normalizado	7.8%

En la Figura 3.31 y en la Tabla 3.13 se presentan las zonas de propiedades resultantes de la validación, siendo agrupadas las zonas de igual conductividad. Los valores en negrilla, indican que fueron modificadas en el transcurso de la validación.

Figura 3.27
Resultado Validación, (AA-157)-(AA-122)-(AA-114)

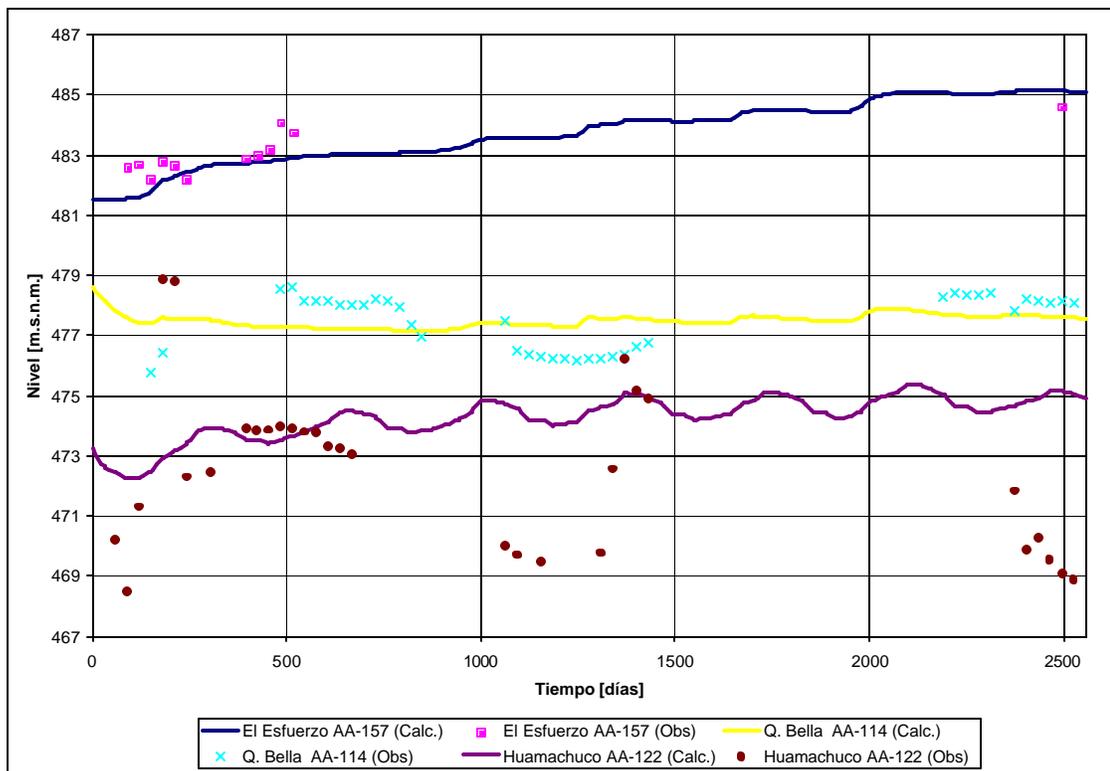


Figura 3.28
Resultado Validación, (AA-156)-(AA-142)- (AA-65)

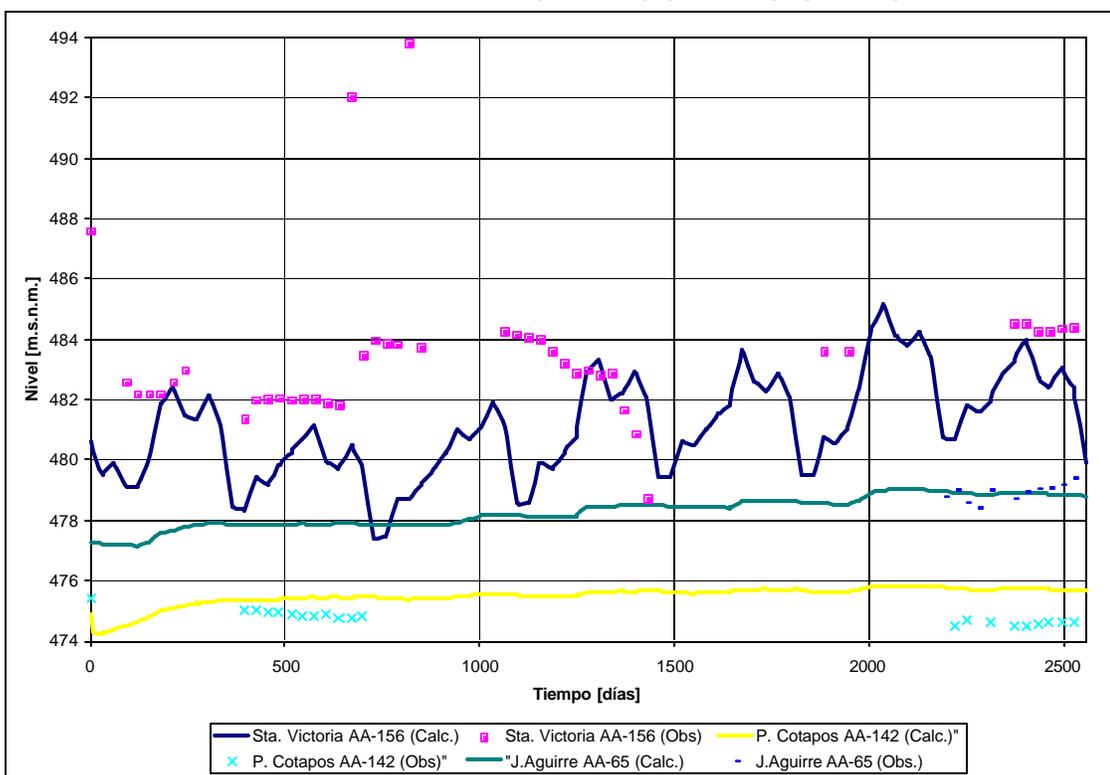


Figura 3.29
Resultado Validación, (AA-19)-(AA-112)

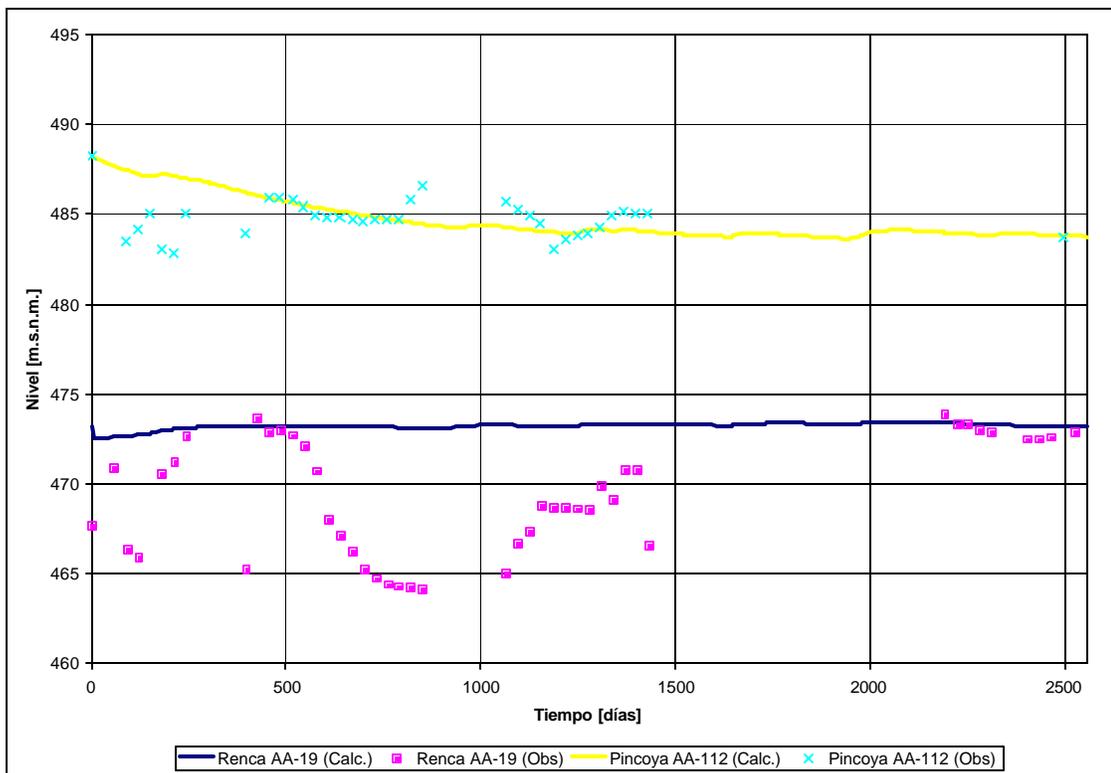


Figura 3.30
Resultado Validación, (AA-78)-(AA-108)-(AA-204)

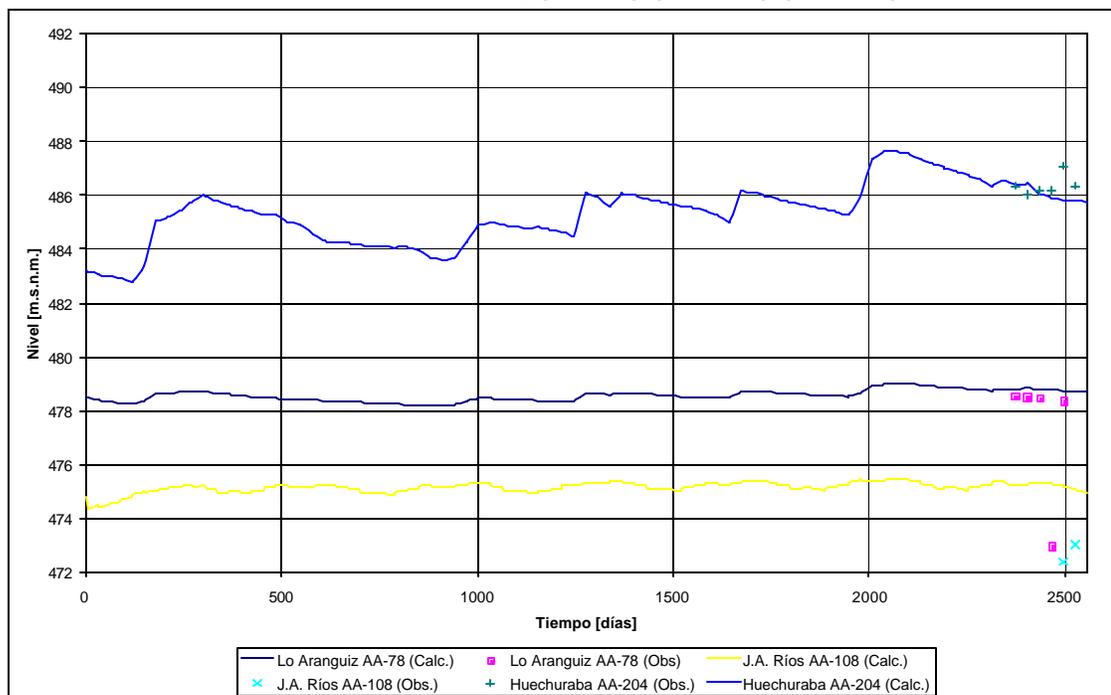
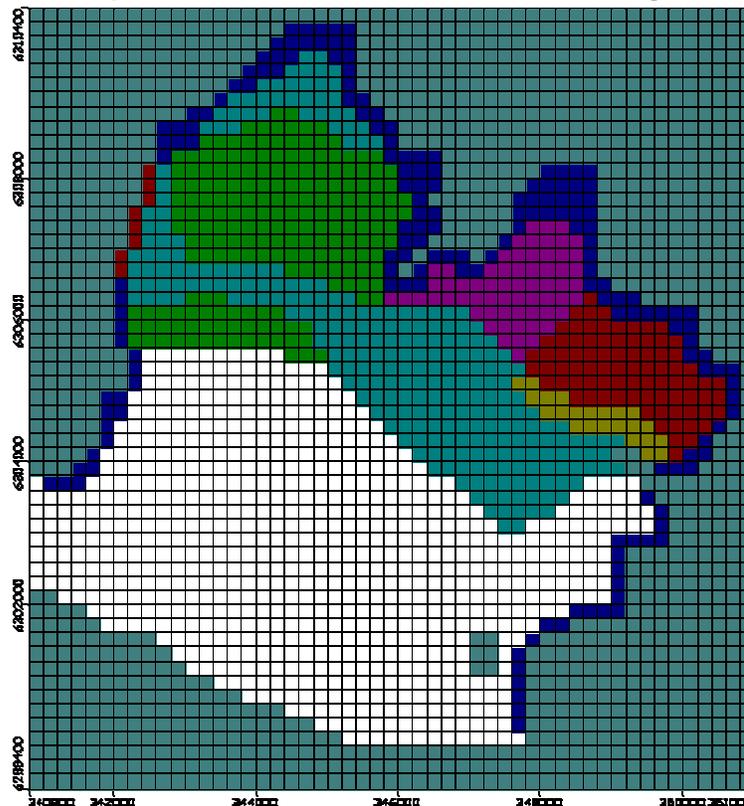


Tabla 3.13
Conductividad Hidráulica Obtenido luego de Validación

Zona N°	Color VMod	Validación	
		Kx=Ky [m/día]	Kz [m/día]
1		70	7
2		10	1
3		0.03	0.003
4		0.1	0.01
5		0.009	0.0009
6		0.02	0.002
7		0.012	0.0012
8		0.3	0.03

Figura 3.31
Distribución Espacial de Conductividad Hidráulica luego de Validación



Por otro lado, se podría haber utilizado los pozos con información de nivel de 1998, pero dado que sólo se cuenta con un solo dato de nivel que pudo haber sido registrado entre enero y julio de 1998 se desecha esta opción. Se tiene que tener en cuenta, que por el nivel de información disponible, el modelo representa en forma general el comportamiento del acuífero, por lo que una validación con información puntual no es coherente. Por esta razón se mantiene la validación anterior.

Ahora, finalizado el proceso de validación, el modelo está listo para ser utilizado para simular eventos de interés como sequías prolongadas, cambio uso de suelo, aumento o disminución de bombeos, impermeabilización de cauces y en general lo que se quiere simular con el modelo.

3.6 Análisis de Sensibilidad

Con el objeto de conocer la respuesta del modelo ante variaciones en el tamaño de las celdas en la malla del modelo matemático, se comparan las equipotenciales en cuatro perfiles transversales (Este: 431,000 ; 345,300; 346,700 y 348,700) y el balance de flujos, para las discretizaciones 200mx200m, 100mx100m y 50mx50m.

En las Figuras 4.32 a 4.35 se presenta la comparación de las equipotenciales en los perfiles arriba mencionados. Se observa que en general las equipotenciales coinciden en las tres discretizaciones, difiriendo en algunos puntos específicos, en donde existen cambios en el gradiente hidráulico.

En tanto en las Figuras 3.36 y 3.37 se comparan los flujos de entrada y salida al AZNS respectivamente. A medida que el tamaño de las celdas disminuye, se evidencia un aumento en el flujo entrante por las zonas donde se definieron condiciones de borde de carga constante. Esto se debe a que celdas de menor tamaño pueden representar de forma más exacta los gradientes inducidos por la condición de borde. Este aumento en los flujos entrantes se traduce en un incremento de los flujos de salida y no en un aumento en los niveles, gracias a que el acuífero en el sector bajo, donde se establecieron las condiciones de borde, (ver acápite 3.3.5), presenta altas conductividades (~70 m/día).

Figura 3.32
Comparación Equipotencial Perfil Este: 343,100 [m]

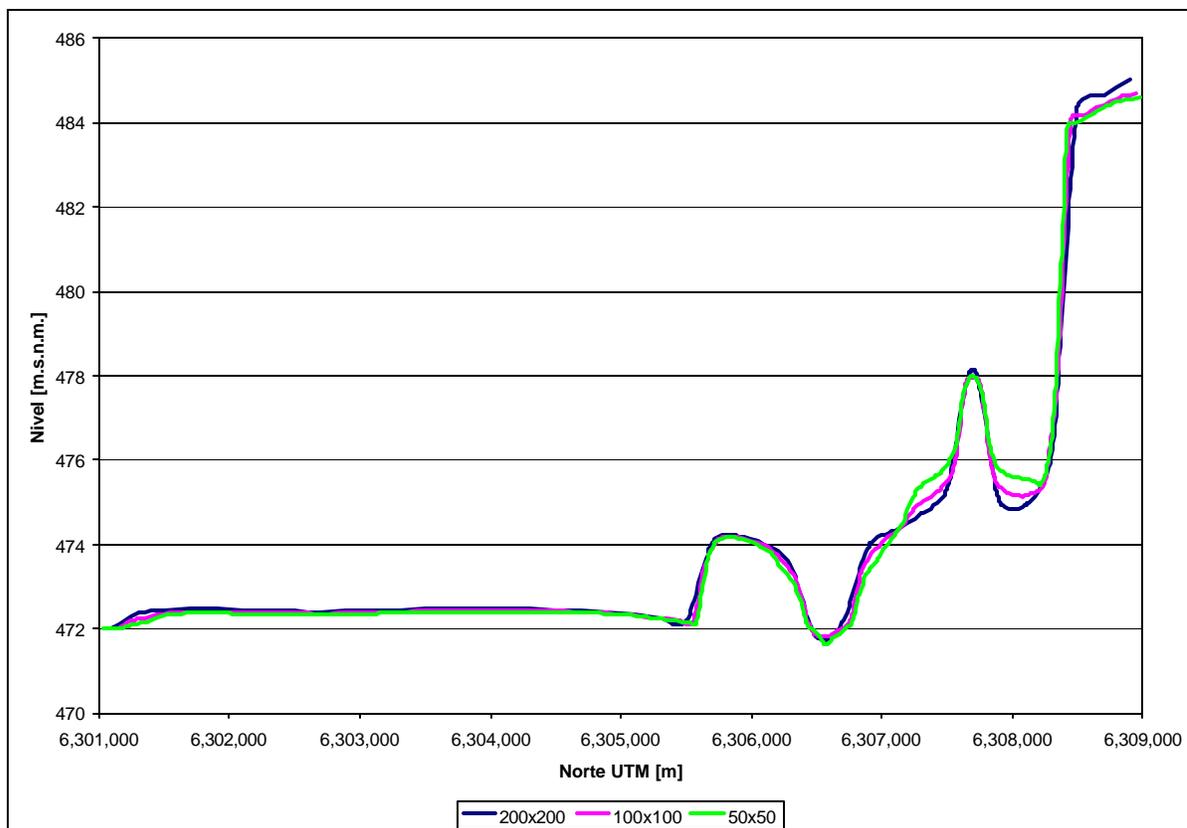


Figura 3.33
Comparación Equipotencial Perfil Este: 345,300 [m]

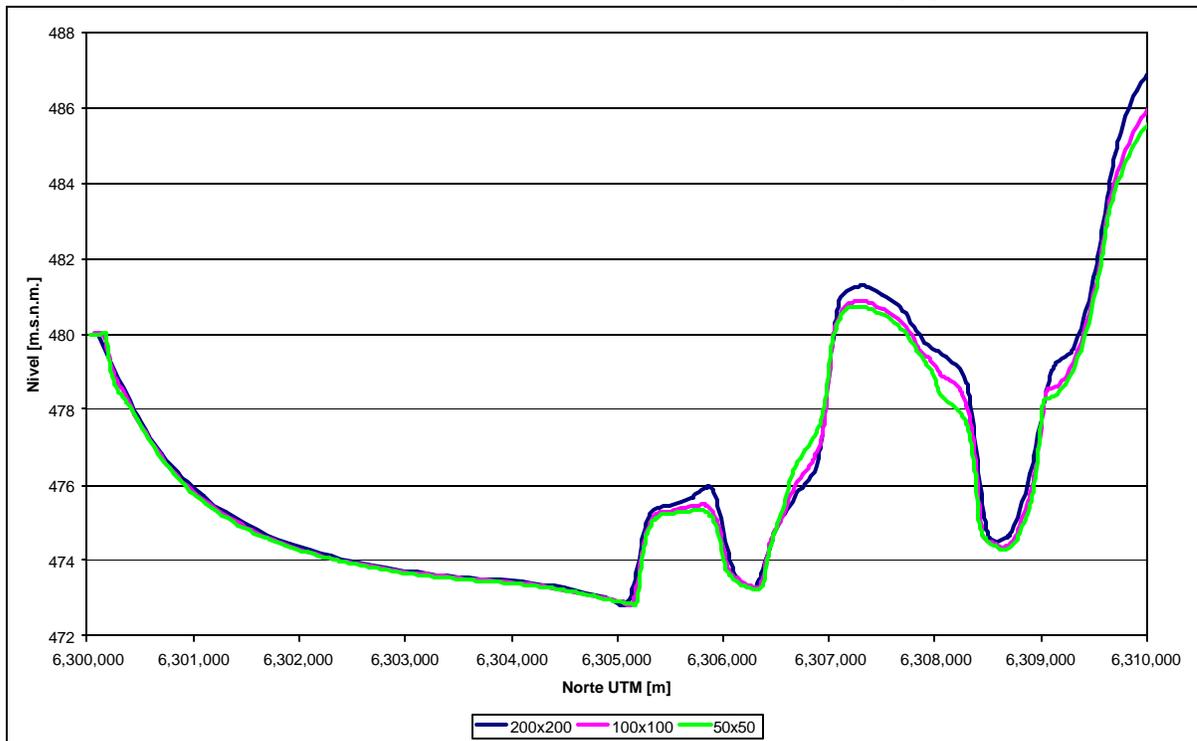


Figura 3.34
Comparación equipotencial perfil Este: 346,700 [m]

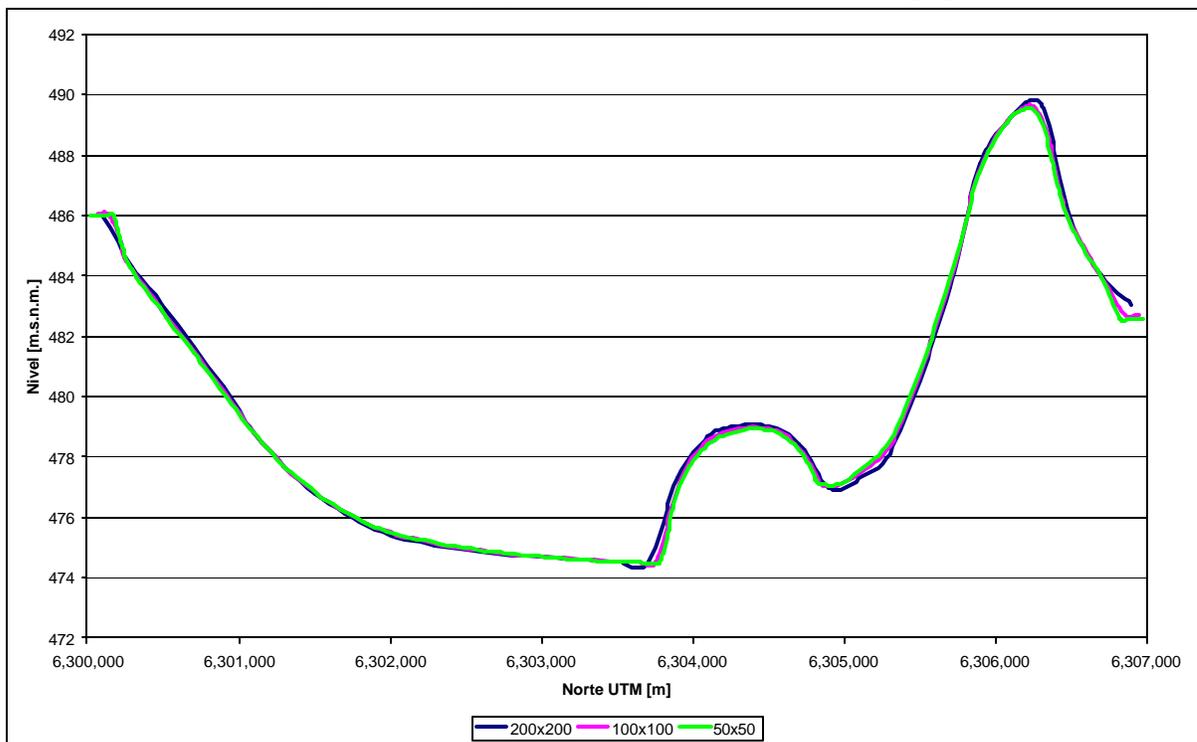


Figura 3.35
Comparación equipotencial perfil Este: 348,700 [m]

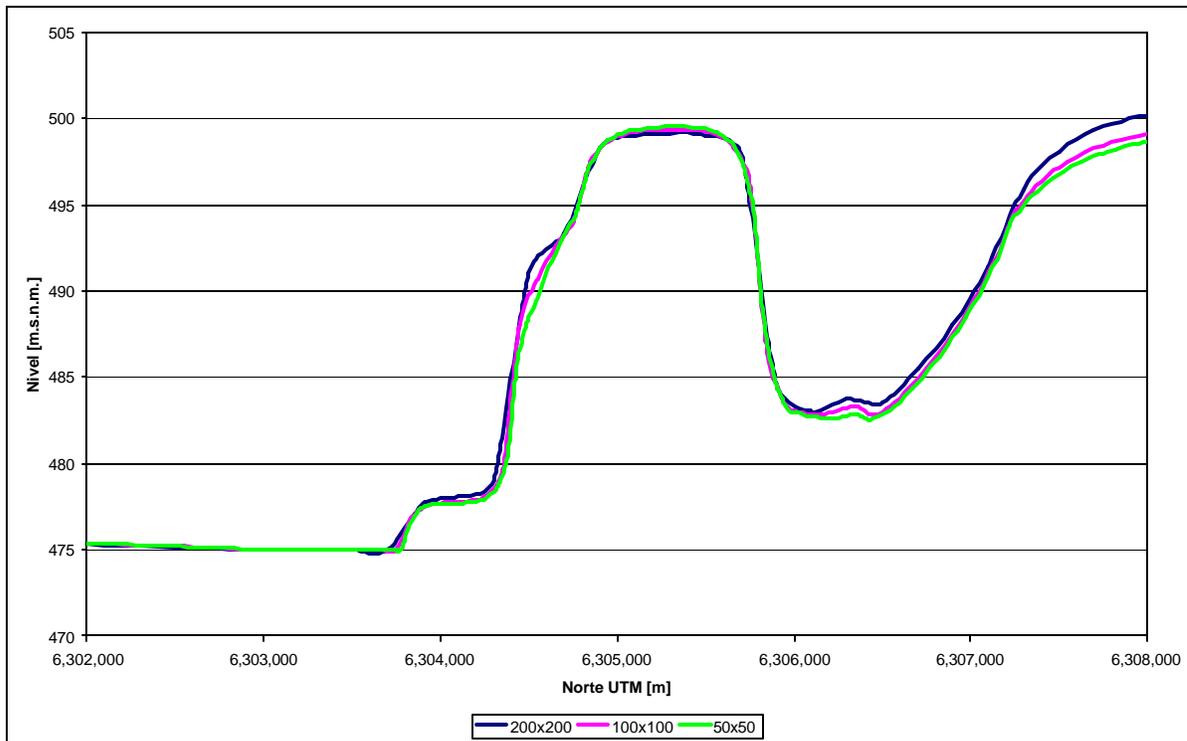


Figura 3.36
Comparación Flujos Entrantes

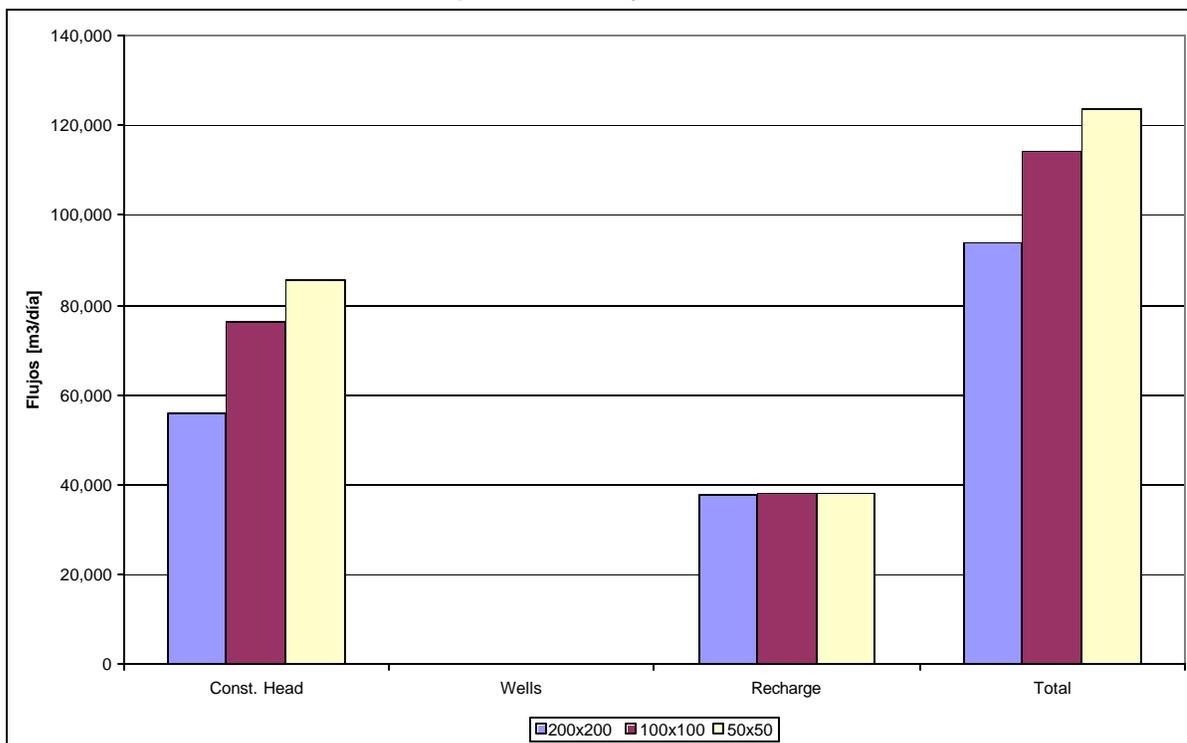
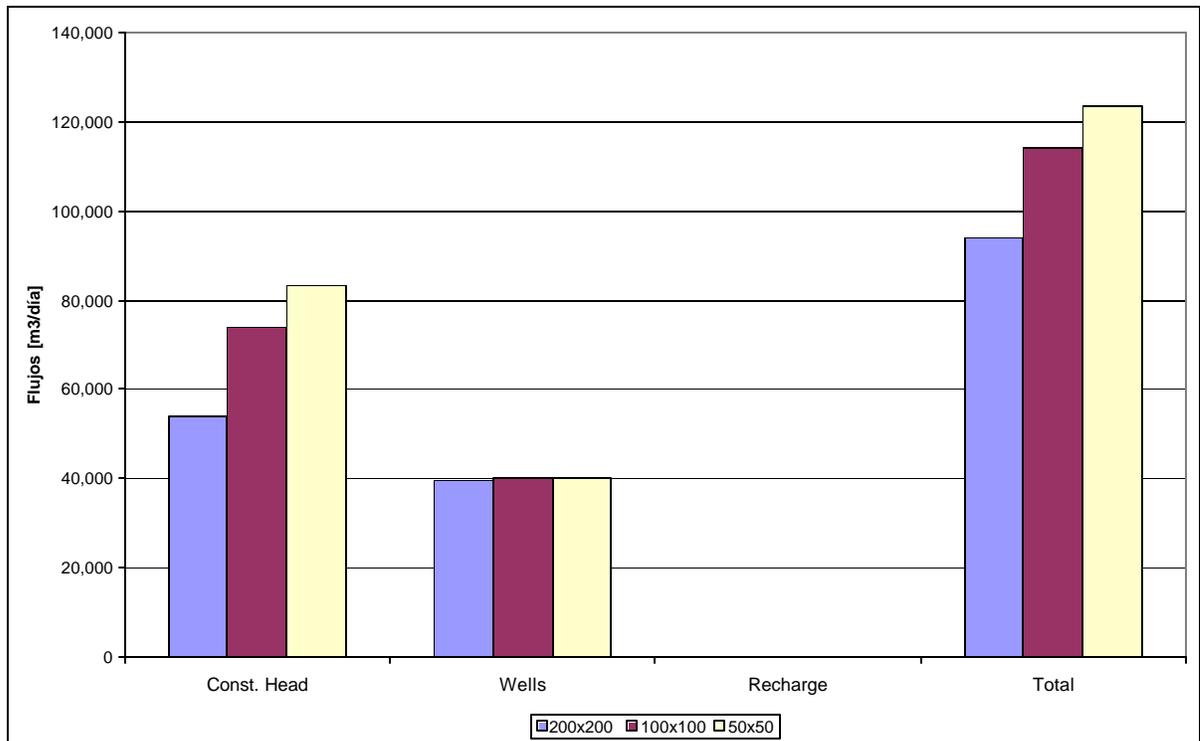


Figura 3.37
Comparación Flujos Salientes



4. APLICACIÓN DEL MODELO

4.1 Generalidades

Si bien el objetivo de generar un modelo de simulación de flujos del AZNS para ser aplicado como herramienta de gestión ha concluido con el capítulo anterior de validación, se han querido realizar algunas simulaciones para prever el comportamiento del acuífero ante situaciones que en el futuro puedan presentarse.

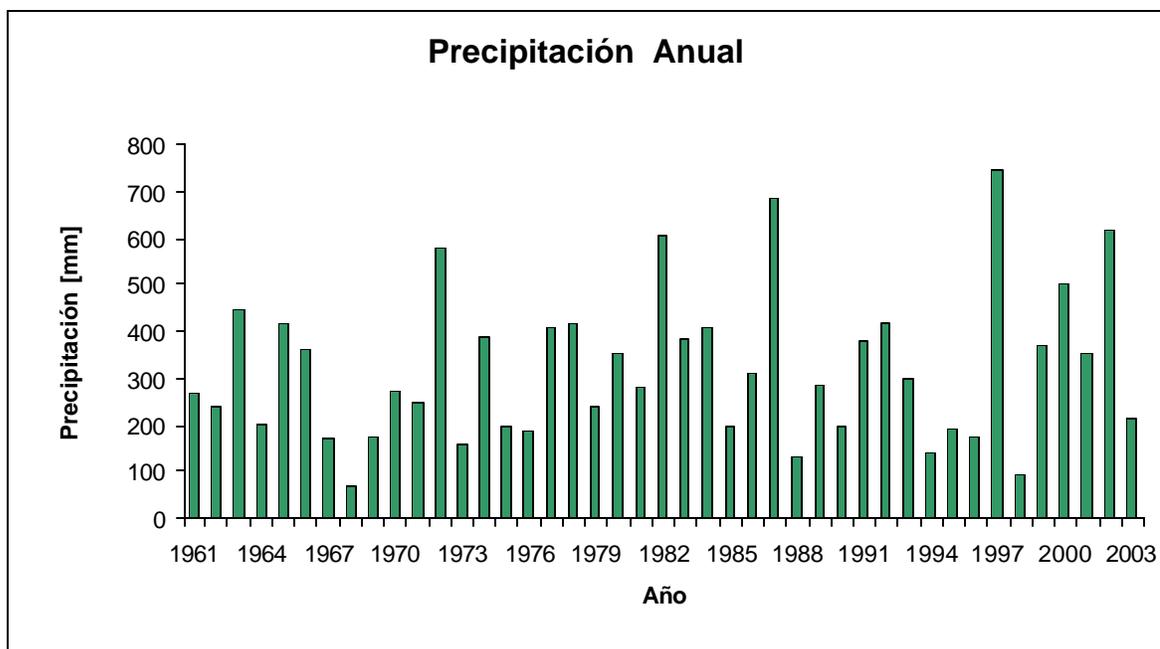
Para establecer un punto de comparación se simulará la situación actual para un período de 43 años. Esta situación base se comparará con la eliminación de la infiltración del canal El Carmen producto de un hipotético revestimiento. Luego se incluirán el efecto de los desarrollos urbanos que con seguridad terminarán cubriendo un alto porcentaje del sector de Huechuraba, suprimiendo las actuales zonas de infiltración por regadío. También se tomará en cuenta un aumento en la explotación subterránea debido al incremento de la demanda poblacional de agua potable.

Si bien es claro que el número de habitantes se incrementará y que la estabilidad de las condiciones de borde para el período de simulación son cuestionables, el objeto de la situación base no es de simular lo que a futuro sucederá, sino que contar con un punto de referencia para comparar el comportamiento del acuífero ante las situaciones mencionadas con anterioridad.

4.2 Generación de Estadística

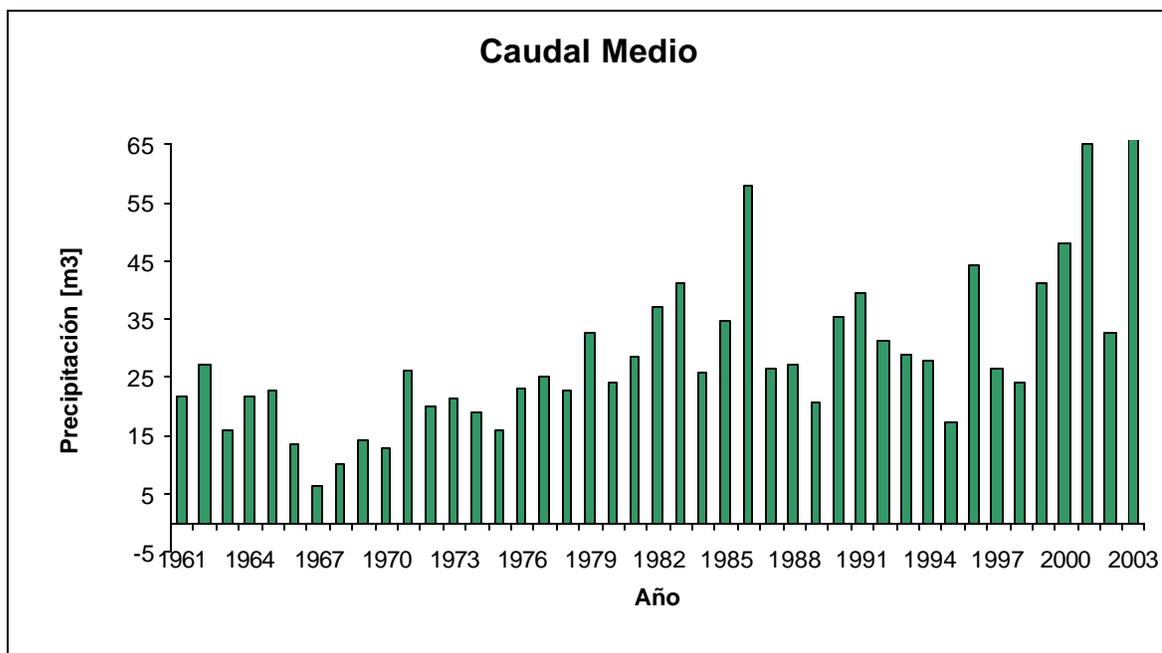
Se simulará los siguientes 43 años (2004 a 20046) utilizando las mismas estadísticas pluviométricas de Santiago edificio MOP y fluviométricas de Mapocho en Rinconada de Maipú, disponibles desde 1961. En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran las precipitaciones y caudales medios anuales del período de simulación respectivamente.

Figura 4.1
Precipitación Anual Santiago. Edificio MOP 1961-2003 (2004-2046)



Fuente: DGA

Figura 4.2
Caudales Medios Anuales Río Mapocho en Rinconada Maipú 1960-2003



Fuente: DGA

4.3 Simulación de Escenarios

4.3.1 Simulación Base

Se toma como situación base las actuales consideraciones de infiltración, explotación, distribución.

4.3.2 Simulación A: eliminación infiltración canal El Carmen

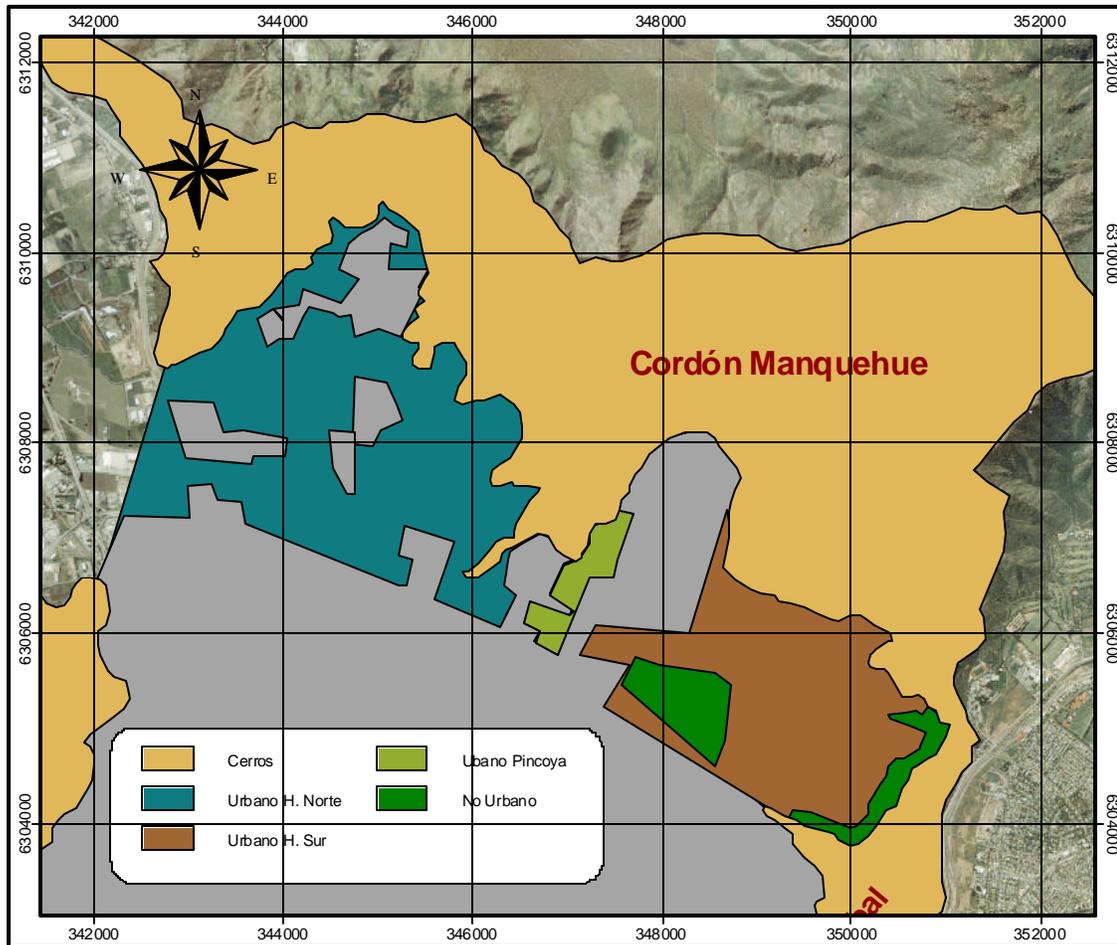
Se basa en la simulación base, eliminando la infiltración correspondiente al canal El Carmen.

4.3.3 Simulación B: cambio uso de suelo

Manteniendo la simulación B, se redefinen los sectores no urbanizados de la comuna de Huechuraba como urbanos, eliminando la infiltración por regadío, incluyendo la por pérdida de la red de agua potable y alcantarillado, y cambiando el coeficiente de infiltración por precipitación. Esto significa aumentar la superficie urbana de 46 km² a 58 km² y disminuir los sectores no urbanizados de 13.5 km² a 1,5 km², quedando como no urbanos sólo el cementerio Parque el Recuerdo y Parque Santiago.

Considerando un 75% de la actual densidad poblacional de 11.000 hab./km² (505 mil hab. en 46 km²), se estima que la población podrá aumentar en 100.000 hab. en la comuna de Huechuraba, distribuyéndose éstos en 65.000 hab. en los sectores no urbanizados de Huechuraba Norte y los restantes 35.000 hab. en la zona no urbana de Huechuraba Sur, dividiéndose esta última en 29.000 en el sector de El Salto y 6.000 en los sectores no urbanizados de la Pincoya. En la Figura 4.1 se aprecia la distribución de la población antes descrita. Sobre estas nuevas áreas urbanas se aplican los mismos criterios de infiltración descritos en el Capítulo 3.

Figura 4.3
Nuevas Zonas Urbanas y no Urbanas en Huechuraba para Simulación C



Fuente: elaboración propia.

4.3.4 Simulación C: incremento demanda agua subterránea

Esta simulación toma como base la anterior, aumentando los bombeos para suplir la demanda de agua potable de la población considerada en la simulación B. En la Tabla 4.1 se muestran las nuevas demandas de agua potable, en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3 los pozos que suplirán esta demanda, detallando su actual bombeo y su capacidad de bombeo remanente. En la Figura 4.4 se muestra la ubicación de estos pozos.

Tabla 4.1
Nueva demanda de agua potable

Huechuraba	Sector	Aumento hab.	Dotación [l/hab/d]	Pérdida Red	A.P. Requerida [l/s]
Norte	P. Fontova	65,000	250	20%	225.7
Sur	Pincoya	6,000	250	20%	20.8
Sur	El Salto	29,000	250	20%	100.7

Tabla 4.2
Pozos para Suplir Aumento en Demanda de Agua Potable, Huechuraba Norte

Código	Sector	Este	Norte	Q.P.B. [l/s]	Q.B.A. [l/s]	Q en uso [l/s]	Q por explotar [l/s]	Q a ser explotado [l/s]
AA-204	Huechuraba	344,750	6,307,810	55.00	18.33	15.09	3.24	18.00
AA-205	Huechuraba	344,740	6,307,235	45.00	15.00	10.15	4.85	15.00
AA-208	Huechuraba	343,550	6,307,730	110.00	36.67	3.88	32.78	35.00
AA-209	Huechuraba	343,330	6,307,750	95.00	31.67	24.83	6.84	30.00
AA-213	Huechuraba	343,790	6,307,880	110.00	36.67	11.79	24.87	35.00
AA-214	Huechuraba	344,100	6,307,850	100.00	33.33	8.01	25.32	30.00
Subtotal				515.00	171.67	73.75	97.92	163.00
PB-01	Huechuraba	343,600	6,308,850	85.00	28.33	0.00	28.33	25.00
PB-02	Huechuraba	345,450	6,308,400	85.00	28.33	0.00	28.33	25.00
PB-03	Huechuraba	344,600	6,309,400	85.00	28.33	0.00	28.33	25.00
Total				770.00	256.67	73.75	182.92	238.00

Q.P.B: caudal pozo de bombeo

Q.B.A: caudal bombeo adoptado (0.33·Q.P.B.)

Tabla 4.3
Pozos para Suplir Aumento en Demanda de Agua Potable, Huechuraba Sur

Código	Sector	Este	Norte	Q.P.B. [l/s]	Q.B.A. [l/s]	Q en uso [l/s]	Q por explotar [l/s]	Q a ser explotado [l/s]
AA-112	Pincoya II	348,109	6,306,408	80.00	26.67	0.00	26.67	21.00
AM-655	El Salto	349,290	6,304,960	43.00	14.33	0.00	14.33	14.00
AM-657	El Salto	349,352	6,305,150	90.00	30.00	0.00	30.00	30.00
AM-659	El Salto	349,407	6,305,324	85.00	28.33	0.00	28.33	28.00
AM-660	El Salto	348,924	6,304,300	97.00	32.33	0.00	32.33	30.00
Total				395.00	131.67	0.00	131.67	123.00

Q.P.B: caudal pozo de bombeo

Q.B.A: caudal bombeo adoptado (0.33·Q.P.B.)

Finalmente en la Tabla 4.4 se resumen los aumentos de bombeos en los pozos de Huechuraba Norte y Sur

Tabla 4.4
Resumen Aumento de Bombeos en Huechuraba

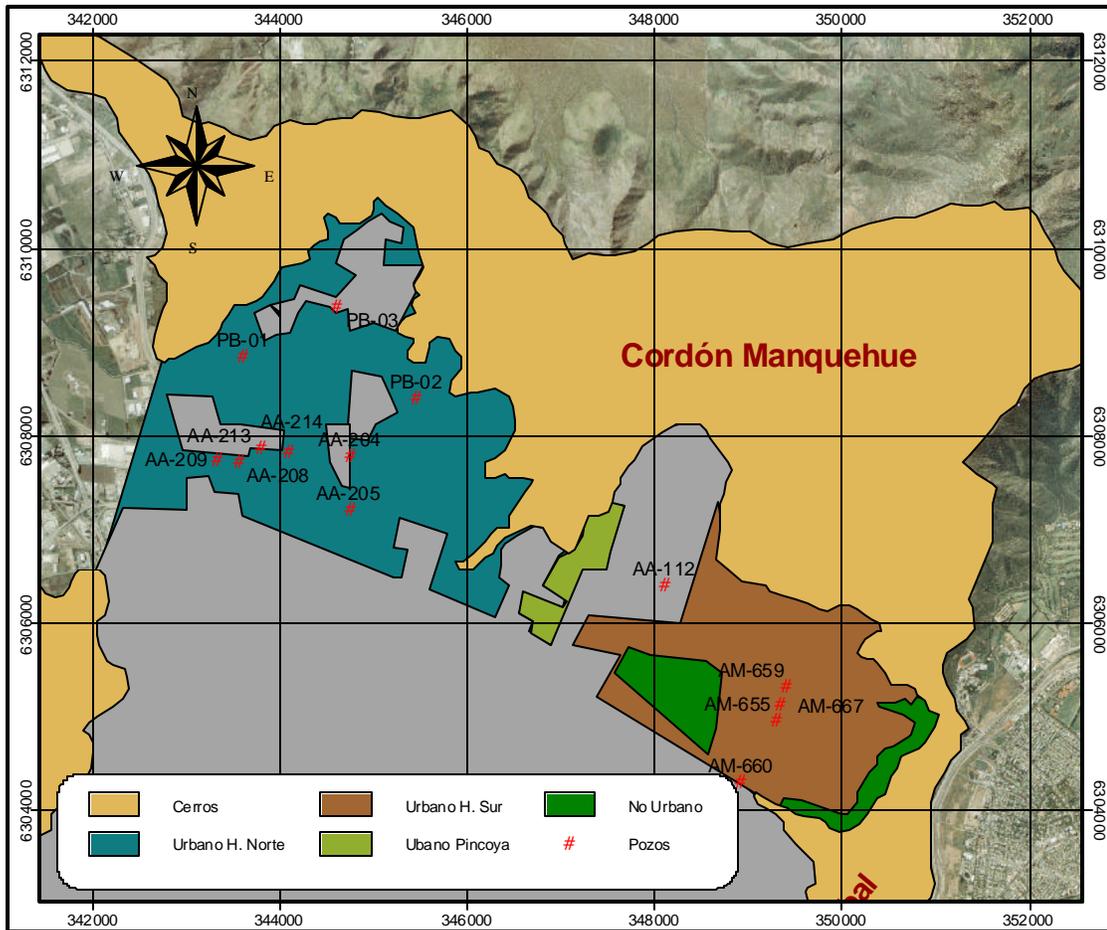
Sector	Q.P.B. [l/s]	Q.B.A. [l/s]	Q en uso [l/s]	Q por explotar [l/s]	Q a ser explotado [l/s]
H. Norte	770.00	256.67	73.75	182.92	238.00
H. Sur	395.00	131.67	0.00	131.67	123.00
Total	1,165.00	388.33	73.75	314.58	361.00

Q.P.B: caudal pozo de bombeo

Q.B.A: caudal bombeo adoptado (0.33·Q.P.B.)

En el sector no urbano de Huechuraba Sur los pozos allí existentes tienen la capacidad de suplir la demanda, teniendo que poner en operación cuatro pozos de Aguas Manquehue (AM) en el sector de El Salto. En tanto que en la zona no urbana de Huechuraba Norte los pozos de Huechuraba no son capaces de suplirla, incluyendo tres nuevos pozos de bombeo (PB) para poder suplir la demanda.

Figura 4.4
Ubicación Pozos para suplir Aumento en la Demanda de Agua Potable



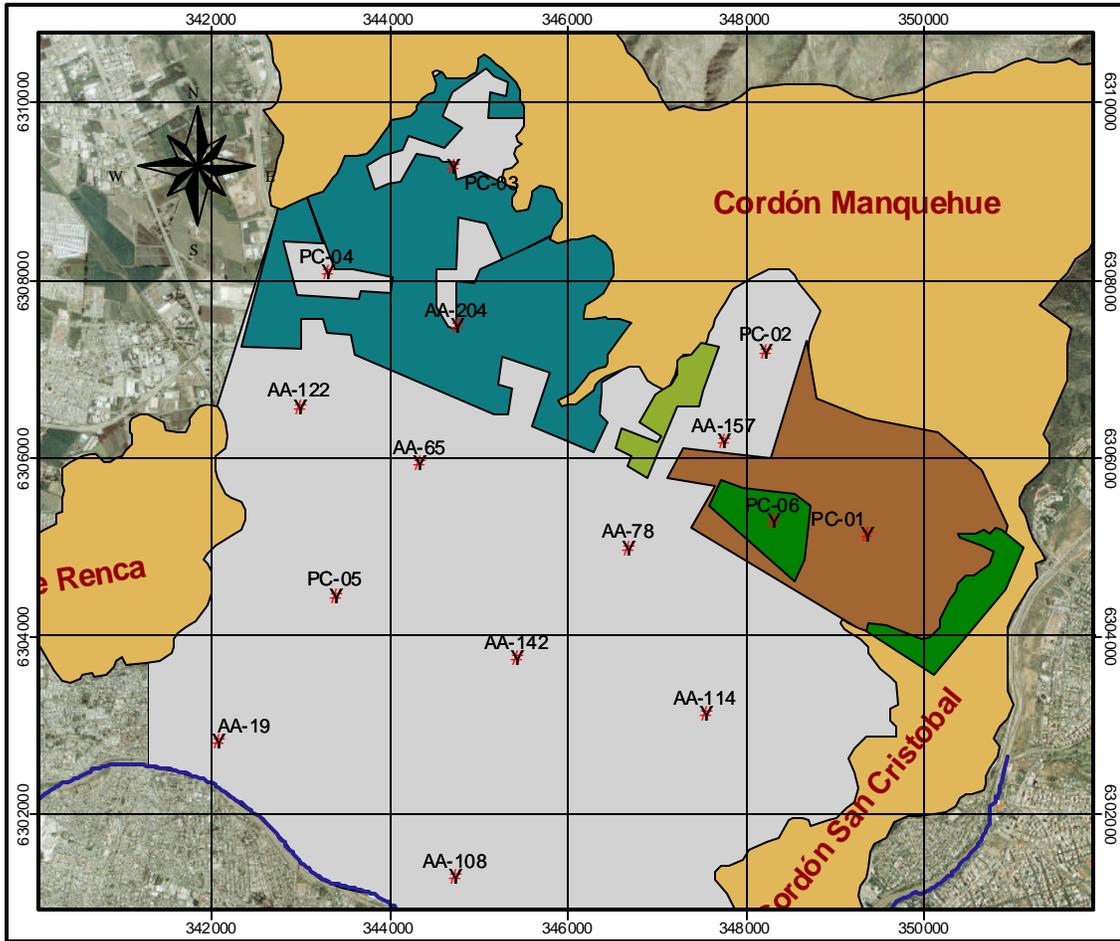
Fuente: elaboración propia.

4.4 Pozos de Control

Para comparar los niveles en las distintas situaciones a simular, se establecen 15 pozos de control estratégicamente ubicados en las cercanías del canal El Carmen, sobre zonas no urbanas que posteriormente se urbanizarán, sobre zonas no urbanas que permanecerán como tales y en la zona baja del acuífero ya urbanizada, para así registrar los cambios de niveles producto de los escenarios de simulación descritos en los capítulos anteriores.

En Figura 4.5 se presenta la ubicación de los pozos de control establecidos para la comparación de niveles entre las distintas simulaciones.

Figura 4.5
Ubicación Pozos Control de Simulaciones



Fuente: elaboración propia.

4.5 Resultados

4.5.1 Niveles piezométricos en el AZNS

En las Figuras 4.6 a 4.7 se presenta la comparación de niveles en el acuífero para cada simulación. Sólo se presentan los pozos de control representativos de los descensos en el AZNS, omitiendo aquellos que presentan comportamientos similares.

En las Figuras 4.6 y 4.7 se presentan los resultados de simulación de los pozos de control ubicados en cercanía del canal El Carmen. El pozo PC-02 se ubica sobre la zona urbanizada de la Pincoya en Huechuraba sur y el pozo PC-03 sobre la zona no urbanizada de Huechuraba norte. Es notorio el abrupto descenso de aproximadamente 8 m en PC-02 producto de la eliminación de la infiltración del canal. En tanto que, en PC-03 se presentan descensos menores (2 m aprox.), ya que éste cuenta con la infiltración de los sectores no urbanos. En este último pozo de control los descensos se acentúan al urbanizar los sectores rurales y al aumentar el bombeo para suplir la demanda de agua potable.

Figura 4.6
Pozo control PC-02, cercano a canal El Carmen sobre sector urbanizado

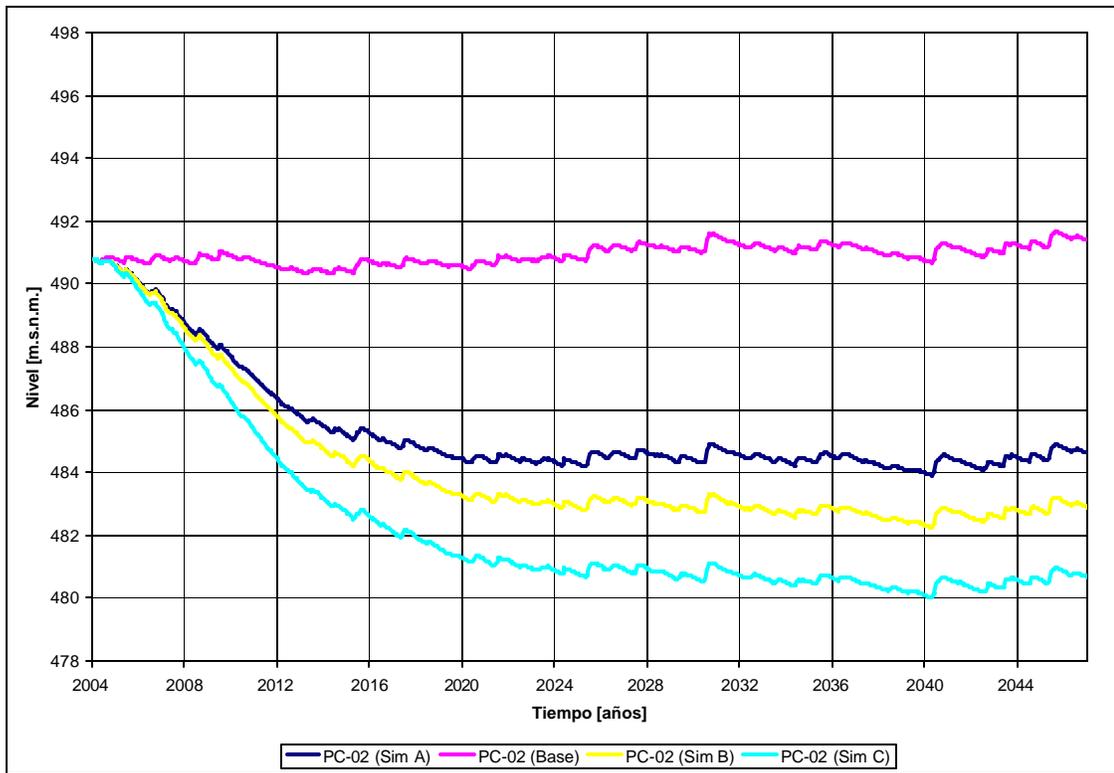
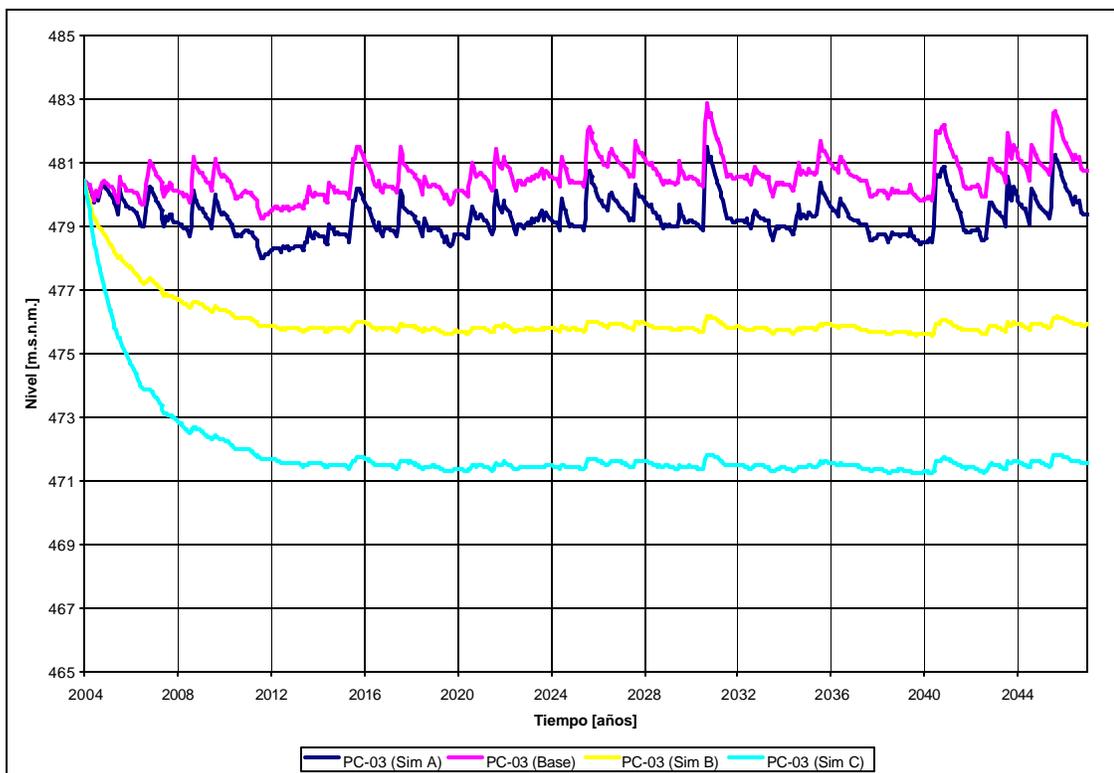


Figura 4.7
Pozo Control PC-03, cercano a Canal El Carmen sobre sector no urbanizado



Los pozos de control PC-01 y AA-204 se encuentran en zonas no urbanas alejados del canal El Carmen, presentando sus mayores descensos (9 m aprox.) por la impermeabilización del suelo no urbanizado. Los descensos producto del revestimiento del canal son menores, del orden de 0.5 m. El aumento de bombeos también afecta los niveles, aunque de forma más notoria en Huechuraba norte, ya que este sector presenta el mayor aumento poblacional. En las Figuras 4.8 y 4.9 se observa lo recién discutido.

En las Figuras 4.10 y 4.11 se observan los niveles en los pozos AA-157 y PC-04, ambos en sectores urbanizados. Dado que PC-04 se encuentra, rodeado de zonas rurales, se esperaría que éste fuese el que presentare mayores descensos al urbanizar los sectores no urbanos. Sin embargo el modelo evidencia mayores descensos en AA-157, esto debido a que éste se encuentra sobre una capa de menor permeabilidad y de mayor espesor que PC-04, determinado las propiedades del acuífero por sobre las infiltraciones los niveles.

En la Figura 4.12 se observa la variación de los niveles en el pozo de control PC-06, ubicado sobre el área del cementerio Parque del Recuerdo, el cual permanecerá como sector no urbanizado. Los descensos son notoriamente menores que los que presentan los pozos cercanos (PC-01 y AA-157), dado que el sector conserva sus fuentes de infiltración

Las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 muestran el comportamiento de los niveles en los sectores de acuífero libre, influenciado principalmente por los flujos subterráneos regionales. El descenso en los niveles en éstos es cada vez menor, a medida que se ubican a mayor distancia de los sectores de infiltración. La simulación C, con su aumento en las tasas de bombeo es el que mayor influencia ejerce en sus descensos.

Para visualizar de mejor forma el comportamiento de los niveles ante las distintas simulaciones, se presentan los descensos (en todo el AZNS) las simulaciones A, B y C con respecto a la simulación base al año 2046, en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18 respectivamente.

En la Figura 4.16 se aprecia que al cesar las infiltraciones del canal El Carmen, la zona más afectada es el sector urbanizado de La Pincoya, dado que no cuenta con la infiltración de los sectores de regadío que ayuden a mitigar la menor infiltración.

Al poblar las zonas no urbanas en la simulación B (Figura 4.17), éstas son las que mayores descensos presentan, acentuándose éstos en el sector de la Pirámide, donde la tasa de regadío es mayor que en Huechuraba norte. Se aprecia que el sector más afectado por los descensos es el sector alto de la zona de estudio, donde las influencias de los flujos regionales no se hacen sentir.

En la simulación C, los aumentos de bombeo para suplir la demanda de agua potable producen descensos más bien locales (Figura 4.18), manteniéndose la distribución general de descensos de la simulación B.

Figura 4.8
Pozo control PC-01, en sector no urbanizado de Huechuraba sur

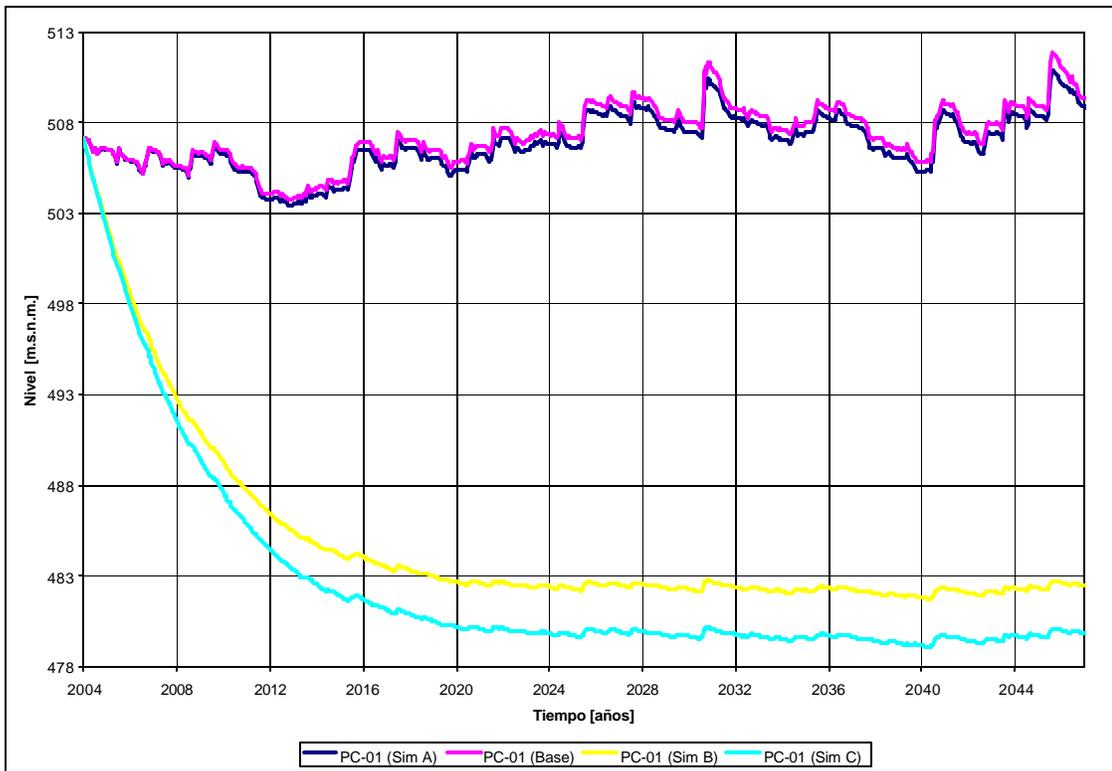


Figura 4.9
Pozo control AA-204, en sector no urbanizado de Huechuraba norte

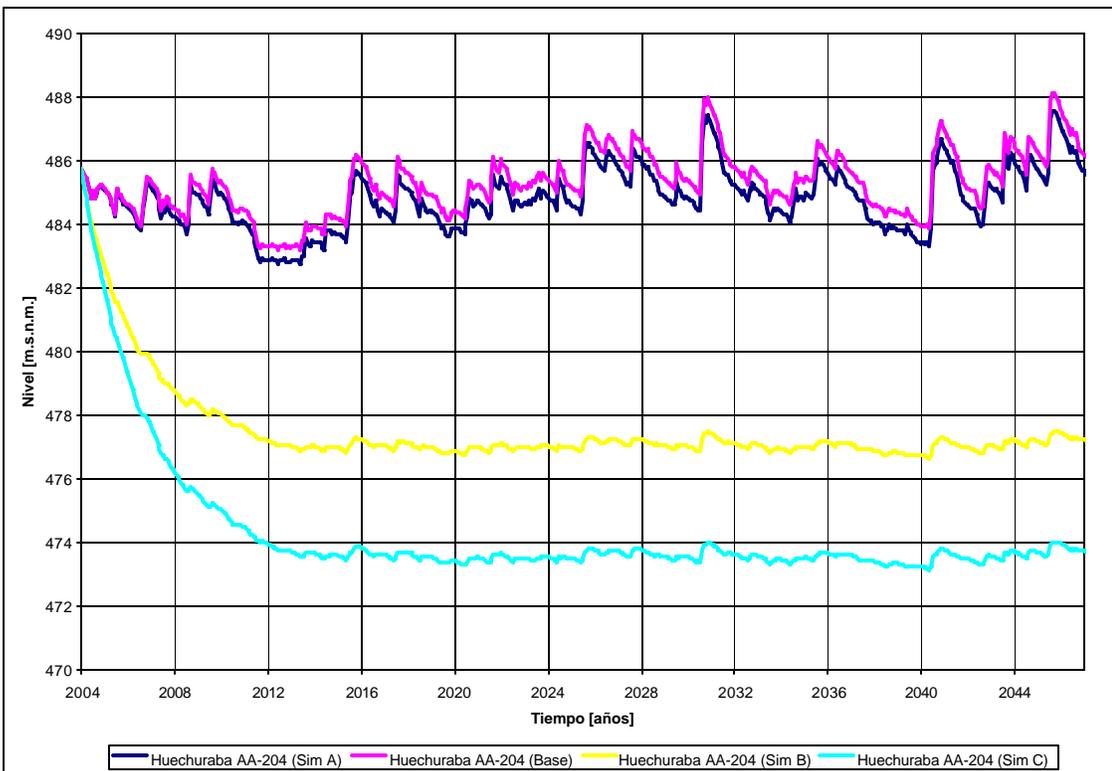


Figura 4.10
Pozo control AA-157, en sector ya urbanizado de la Pincoya (Huechuraba sur)

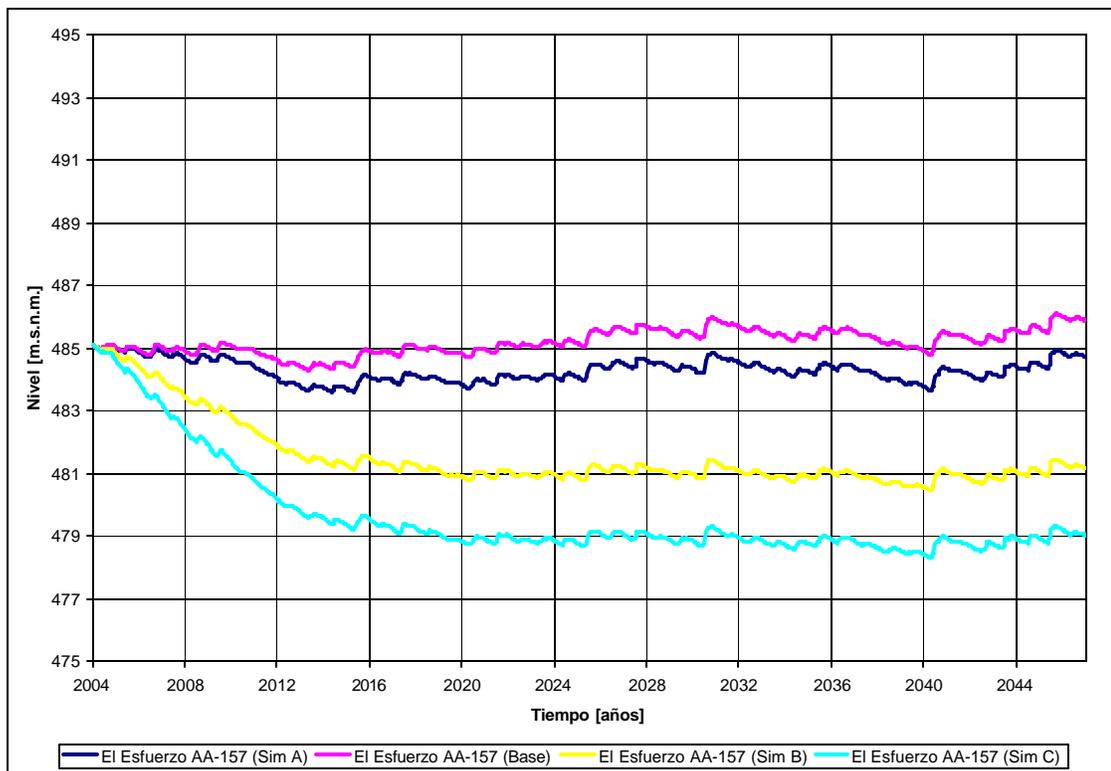


Figura 4.11
Pozo control PC-04, en sector ya urbanizado en Huechuraba norte, rodeado de zonas no urbanas

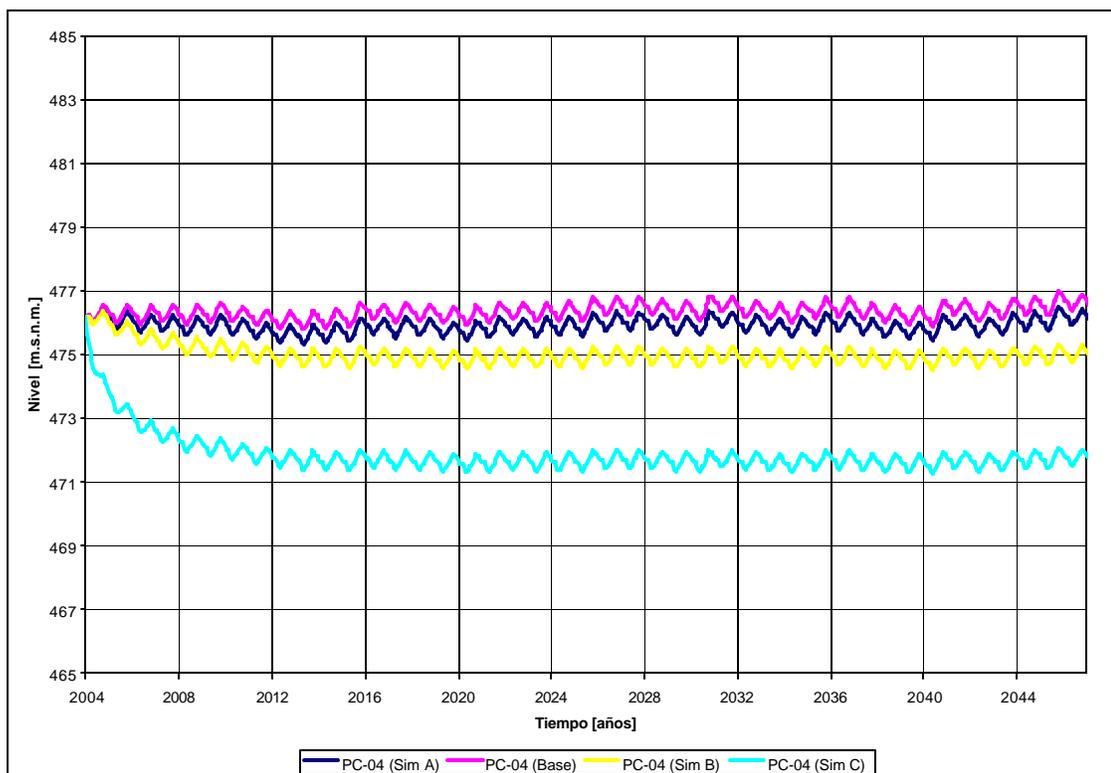


Figura 4.12
Pozo control PC-06, sobre sector que permanecerá no urbanizado

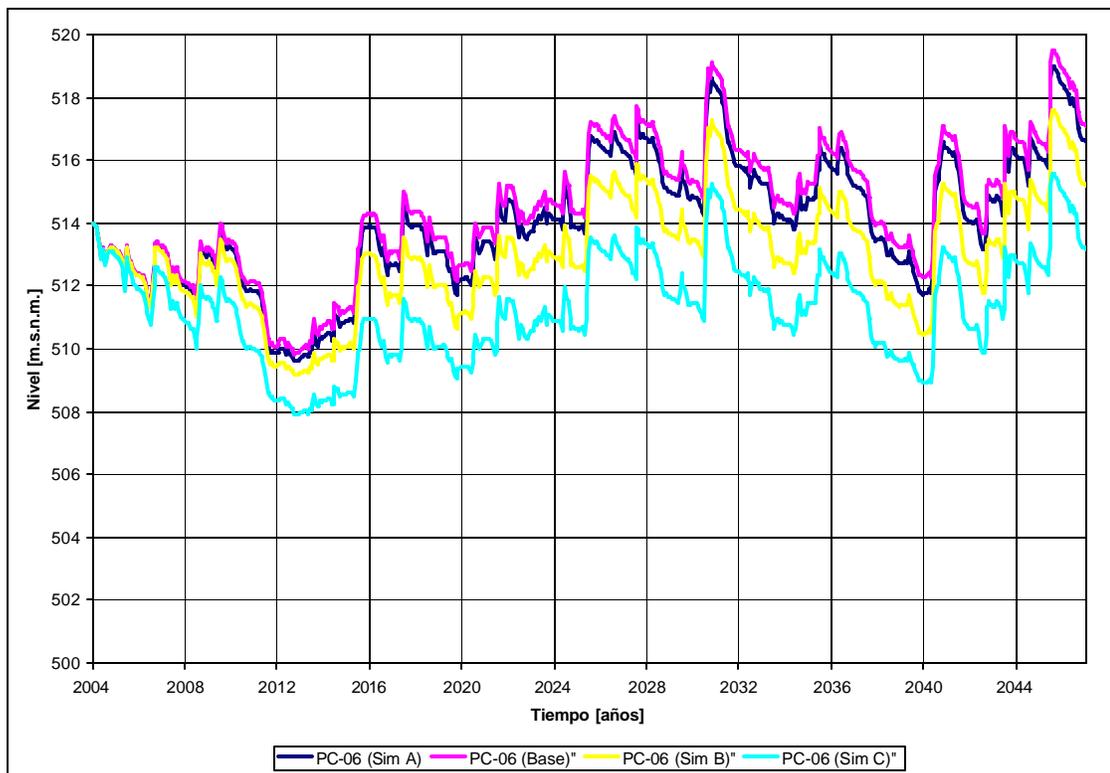


Figura 4.13
Pozo control AA-78, en sector ya urbanizado

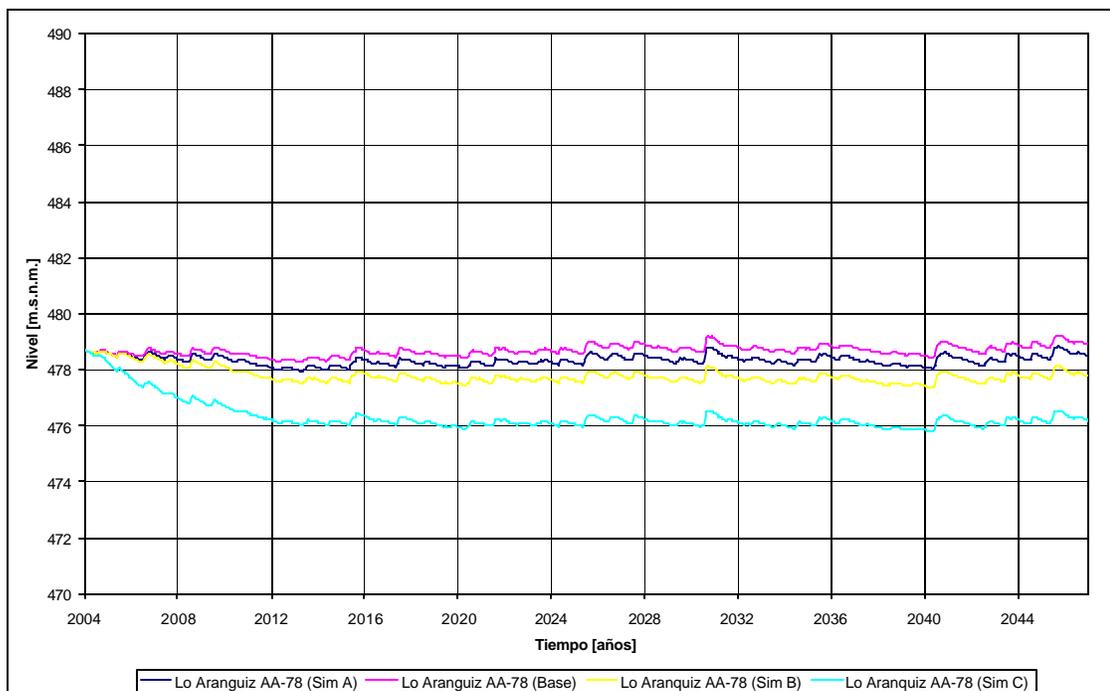


Figura 4.14
Pozo control AA-142, en sector ya urbanizado

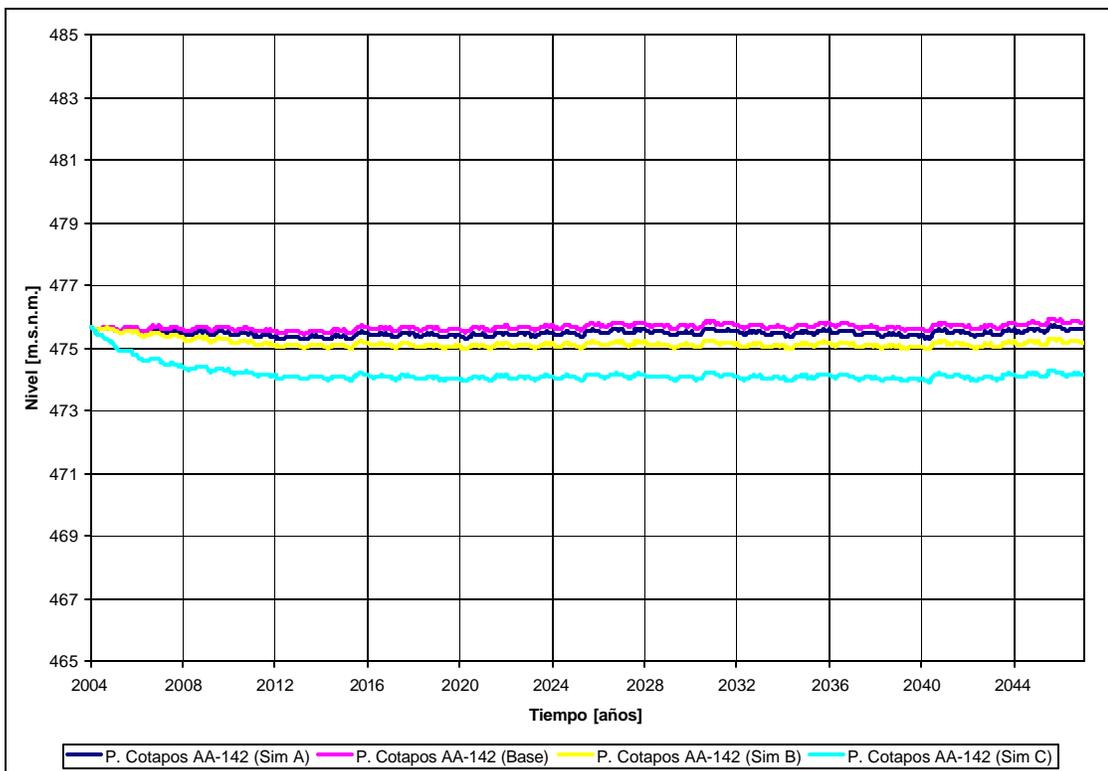


Figura 4.15
Pozo control AA-19, en sector ya urbanizado

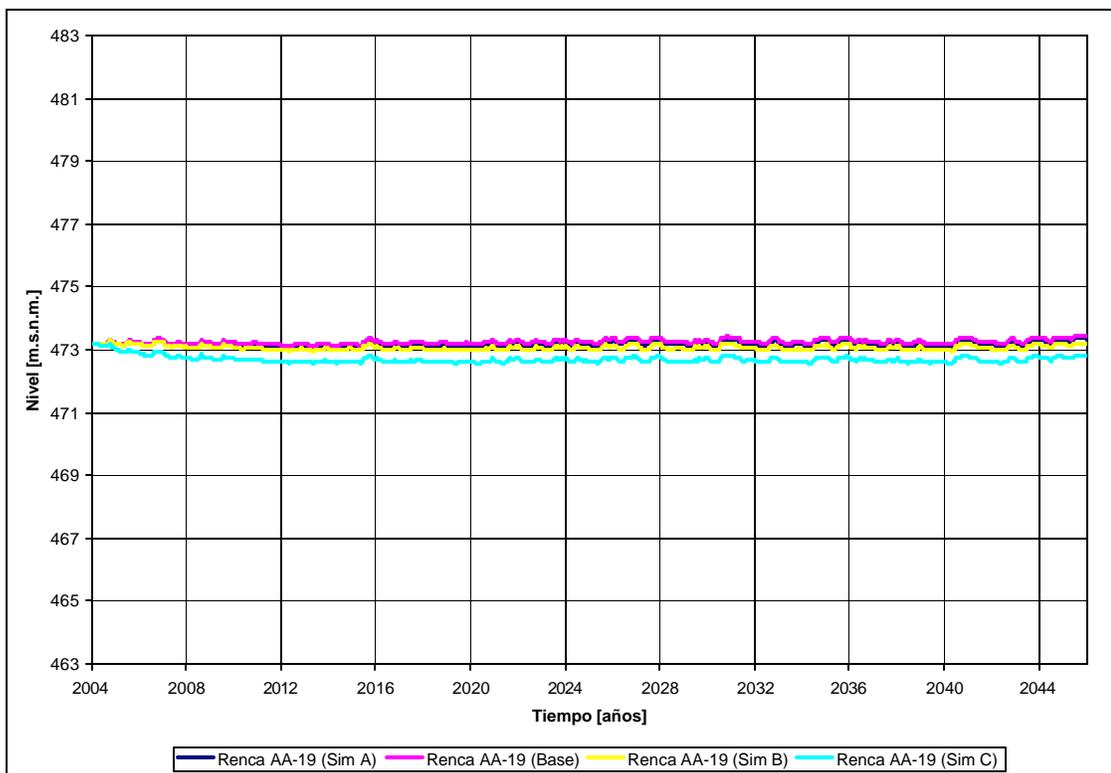
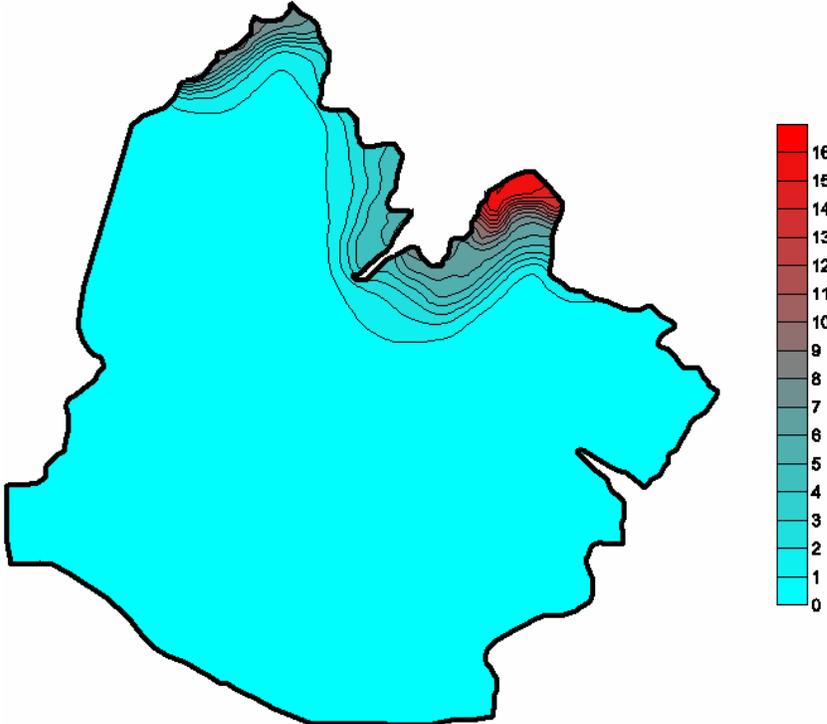
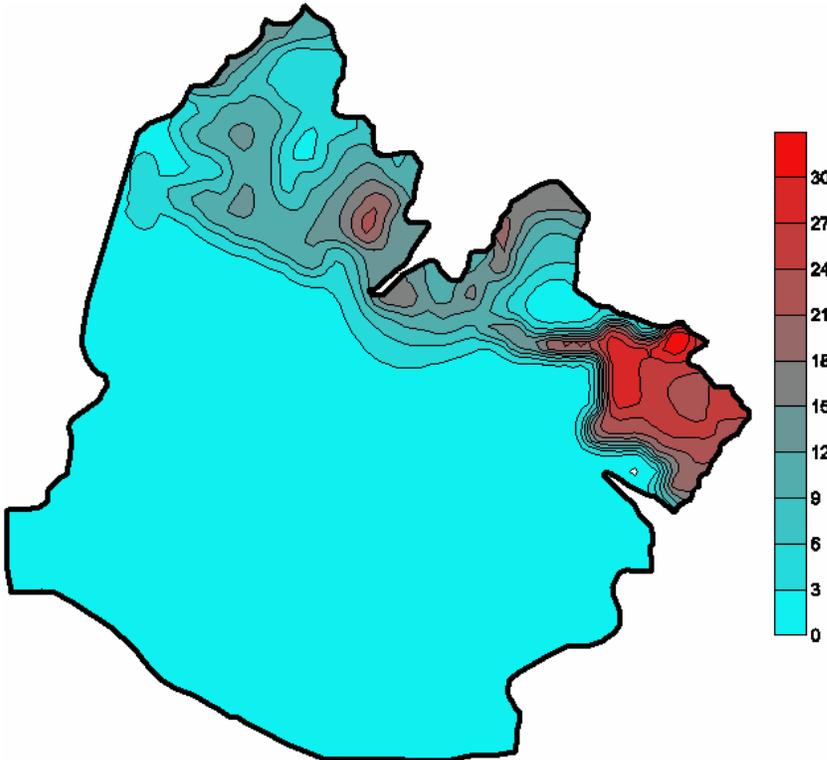


Figura 4.16
Descenso de niveles en AZNS simulación A



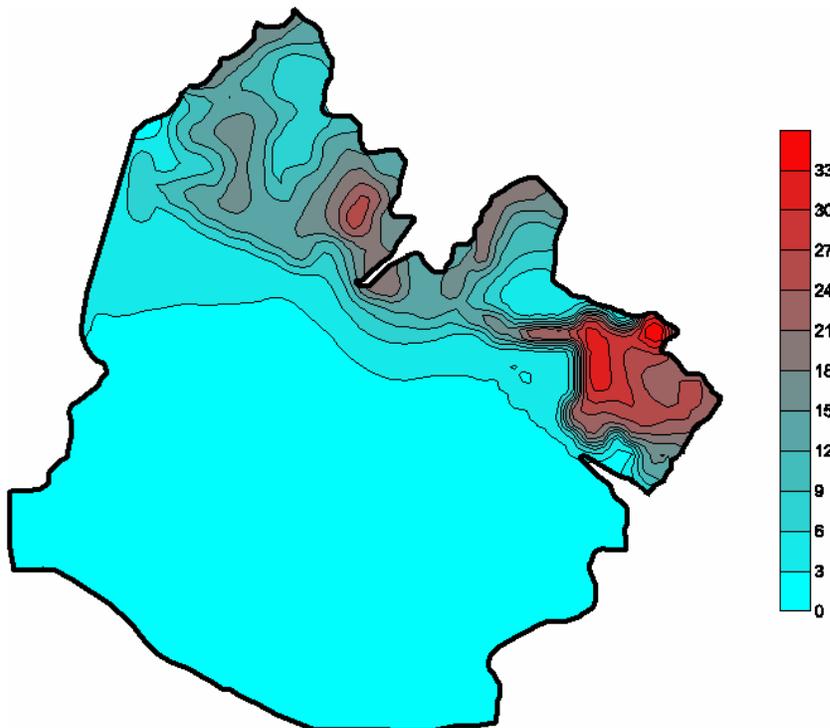
Fuente: elaboración propia.

Figura 4.17
Descenso de niveles en AZNS simulación B



Fuente: elaboración propia.

Figura 4.18
Descenso de niveles en AZNS simulación C



Fuente: elaboración propia.

4.5.2 Control de flujos

Se considera las mismas zonas de control descritas en el acápite 4.4.8 para visualizar el comportamiento de los flujos que entran y salen de AZNS entre las distintas simulaciones. Para realizar esta comparación se eligen arbitrariamente el período de simulación 100 (Abril 2012). Los resultados se aprecian en las Tablas 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5
Comparación flujos que ingresan al AZNS

Ingreso	Base	Sin Inf. Canal El Carmen Simulación A		Cambio uso Suelo Simulación B		Aumento Demanda A.P. Simulación C	
	[m3/d]	[m3/d]	Variación	[m3/d]	Variación	[m3/d]	Variación
Almacenamiento	2,820	3,316	17.6%	4,574	62.2%	5,223	85.2%
Carga Constante	0	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
Bombeo	0	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
Recarga	30,881	26,043	-15.7%	18,344	-40.6%	18,331	-40.6%
Zona 2	48,329	48,824	1.0%	49,532	2.5%	52,193	8.0%
Zona 3	3,605	3,955	9.7%	4,722	31.0%	9,133	153.3%
Zona 4	1,602	1,791	11.8%	2,126	32.7%	4,185	161.3%
Zona 5	0	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
Zona 6	6,746	7,356	9.1%	8,306	23.1%	12,206	81.0%
Total	93,983	91,285	-	87,604	-	101,271	-

Los resultados de la Tabla 4.5 indican:

- Una disminución de 16% de la infiltración en la simulación A y de 40% en la B y C.
- Un aumento de hasta 85% en la capacidad de almacenamiento del acuífero.
- Aumento de flujos a través de las condiciones de borde de carga constante en las distintas zonas.
- Que el aumento del flujo por la zona 6 (entre la puntilla de Lo Ruiz y San Luis) es aproximadamente la mitad del aumento de la demás zonas.
- Casi no existe un aumento de flujo en la zona 2, por donde hace ingreso el mayor flujo subterráneo al AZNS, siendo más estable antes variaciones en las condiciones del AZNS.

Tabla 4.6
Comparación flujos que egresan del AZNS

Egreso	Base	Sin Inf. Canal El Carmen Simulación A		Cambio uso Suelo Simulación B		Aumento Demanda A.P. Simulación C	
	[m3/d]	[m3/d]	Variación	[m3/d]	Variación	[m3/d]	Variación
Almacenamiento	1,567	1,349	-13.9%	1,152	-26.5%	1,035	-33.9%
Carga Constante	0	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
Bombeo	34,082	34,082	0.0%	34,082	0.0%	59,227	73.8%
Recarga	0	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
Zona 2	0	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
Zona 3	19,644	18,341	-6.6%	16,602	-15.5%	11,202	-43.0%
Zona 4	12,925	12,198	-5.6%	11,103	-14.1%	7,469	-42.2%
Zona 5	25,457	25,091	-1.4%	24,514	-3.7%	22,211	-12.8%
Zona 6	309	225	-27.4%	148	-52.0%	126	-59.3%
Total	93,985	91,286	-	87,601	-	101,270	-

Los resultados de la Tabla 4.6 indican:

- Una disminución de 34% en la entrega de agua por concepto de almacenamiento.
- El aumento de la demanda de agua potable representa el 74% de las extracciones existentes.
- Una disminución en los egresos del AZNS, siendo notorios en la zona 6, debido a la presencia de arcillas que actúan a modo de tapón entre la puntilla de lo Ruiz y San Luis.

Los cambios en el egreso e ingreso de flujos a través de las condiciones de borde de carga constante se deben en parte por la menor infiltración y mayor demanda del recurso hídrico y en parte por el aumento del gradiente hidráulico al permanecer constante la condición de borde, sin asimilar los descensos de niveles en los acuíferos colindantes con el AZNS.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se ha desarrollado un modelo preliminar de simulación de flujo en el “Acuífero de la Zona Norte de Santiago” (AZNS) para ser integrado con modelos superficiales y otros estudios que darán origen a un modelo global que servirá como herramienta de gestión del recurso subterráneo.

Con respecto al trabajo desarrollado cabe realizar los siguientes comentarios y recomendaciones finales:

- Se ha logrado elaborar un modelo computacional de los flujos subterráneos del AZNS alcanzando un RMS de 2.33 m y un RMS normalizado del 7.8% con un buen grado de ajuste de los niveles freáticos.
- Las principales fuentes de recarga en el sector cercano a los cordones montañosos la constituyen la infiltración por regadío (40%) y la infiltración del canal El Carmen (30%). En cambio en los sectores urbanizados la recarga producto de la pérdida de la red de agua potable y alcantarillado alcanza al 75% de la infiltración. Dada la importancia de las infiltraciones del canal El Carmen y de la red de agua potable y alcantarillado en la recarga total del AZNS, se recomienda realizar estudios para cuantificar en detalle la infiltración del canal El Carmen y de la red de agua potable y alcantarillado, para mejorar el grado de certeza de las estimaciones de descensos de la napa en simulaciones a largo plazo.
- Si bien la infiltración del río Mapocho es considerable, ésta tiene un efecto local, debido a que el río se encuentra en el límite sur del modelo, por donde parte de los flujos internos del acuífero egresan de la zona de estudio, siendo transportadas las infiltraciones del río Mapocho fuera de ella.
- De las simulaciones ejecutadas en el Capítulo 4, se concluye que el sector en la cercanía de los cordones de Huechuraba y San Cristóbal es altamente sensible ante una eventual impermeabilización del canal El Carmen y al revestimiento producto de urbanizaciones en la comuna de Huechuraba. En tanto los sectores próximos al río Mapocho presentan menores descensos de niveles debido a que están influenciados por los flujos regionales y a que dependen de las condiciones de niveles en el acuífero sur.
- Las conductividades y almacenamientos de las distintas zonas se ajustan a partir de los parámetros de entrada, de forma que representen los niveles observados, para así poder generar simulaciones. Es por ello que la precisión del modelo radica en el nivel de certeza de la información de recargas, descargas y de la implementación de las condiciones de borde. Con respecto a las incertidumbres de los parámetros de entrada y su efecto en el modelo, se quiere hacer los siguientes comentarios:
 - Si bien el modelo reproduce satisfactoriamente (error ~ 2.5 m) la tendencia general de los niveles en el acuífero, éste no es capaz de asimilar aumentos o disminuciones de nivel producto de bombeos en períodos específicos, ya que no se cuenta con información confiable de los volúmenes de extracción para cada año. Es por ello que se recomienda recabar información de bombeos de pozos operativos, tanto de Aguas Andinas como pozos particulares catastrados en el estudio AC (2000), para ajustar en el futuro el modelo a un nuevo periodo de información.
 - En el sector no urbanizado de la Pirámide (Av. El Salto) en Huechuraba Sur sólo se cuenta con información de nivel estáticos para el año 1998 en dos puntos, careciendo

de más registros en el período de calibración y validación. En tanto el sector alto de Huechuraba Norte carece de información de niveles. Es por ello que las conductividades en estos sectores se establecen tomando en cuenta la información de los perfiles transversales, pudiendo solamente en el sector de la Pirámide, ajustar su valor en la calibración en régimen permanente. La aplicación del modelo en dichos sectores debe hacerse tomando en cuenta esta restricción. Se recomienda comenzar el monitoreo periódico de niveles (por lo menos una vez en cada estación del año), para mejorar la representatividad del modelo en estos sectores.

- Dado que sólo existen valores estimados del coeficiente de almacenamiento (S), se recomienda realizar pruebas de bombeo con pozos de observación para calcular el coeficiente de almacenamiento en el AZNS. Con esta información se pueden obtener mejores predicciones del comportamiento del acuífero para simulaciones a largo plazo.
- La condición de borde que define el límite sur del AZNS se estableció considerando la estabilidad de los niveles presentada en 1998. Sin embargo esta condición podrá variar en el tiempo, dependiendo de las condiciones hidrogeológicas del acuífero sur. El hecho que los cambios en los egresos e ingresos de los flujos a través de las condiciones de borde de carga constante se deban en parte al aumento del gradiente hidráulico al permanecer constante la condición de borde, hace necesario estudiar en detalle la interacción del AZNS con el acuífero sur y estudiar la posibilidad de extender el límite sur del modelo a sectores donde existan condiciones de niveles más estables.
- Las zonas de propiedades del modelo fueron establecidas a partir de la información estratigráfica de perfiles transversales del área de estudio, siendo ajustadas en el proceso de calibración. De esta forma se obtuvo zonas discretas con valores fijos de conductividad y almacenamiento, difiriendo el valor de la conductividad en más de un orden de magnitud entre algunas zonas vecinas. Para evitar estas diferencias se recomienda contrastar las zonas establecidas con la información de transmisividades existente y suavizar la interfaz entre zonas colindantes.
- La base para contrastar un modelo de flujos subterráneo lo constituye la información de niveles piezométricos, por lo que se recomienda un monitoreo estacional (en verano, otoño, invierno y primavera) en toda el área de estudio.
- La discretización del modelo en celdas cuadradas de 200m es suficiente para representar los flujos en el AZNS, sin embargo, para modelos de transporte de contaminantes se recomienda realizar una discretización más fina. En cuanto a la discretización vertical, si bien el AZNS queda bien representado con dos capas, se recomienda aumentar el número de éstas en caso de querer estudiar flujos verticales; respetando la información estratigráfica de los perfiles transversales.
- La calibración del presente modelo fue realizada manualmente contrastando los niveles observados con los calculados, por lo que los valores de conductividad y almacenamiento resultantes en cada zona no necesariamente minimizan el RMS. Es por ello que se recomienda calibrar con métodos numéricos el modelo para obtener un RMS aún menor.
- Para obtener un modelo global de la zona de estudio se recomienda realizar una calibración integrada del presente modelo subterráneo con el modelo superficial desarrollado por Rojo 2004.
- En base a los resultados de las simulaciones, si bien se presentan grandes descensos en los niveles piezométricos en la comuna de Huechuraba, éstos alcanzan un equilibrio,

siendo sustentable la explotación en las condiciones simuladas. Sin embargo, esta sustentabilidad está ligada a las condiciones de niveles del acuífero sur, quedando el AZNS condicionado a éste.

- Si bien el modelo fue realizado en la versión Visual Modflow 2.8.1, se recomienda implementarlo en versiones más avanzadas (Visual Modflow 3.0. o 4.0) dada la flexibilidad para realizar modificaciones que presentan estas versiones. De esta forma, el presente modelo puede ser complementado a medida que se cuente con nueva información, pudiendo subdividirse las actuales zonas de propiedades, internalizando nuevos datos para así mejorar la representatividad del modelo en las zonas desprovistas de información.

BIBLIOGRAFÍA

- Álamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda (AP 1993). Estudio Aguas Subterráneas de los Sistemas Lo Contador, Huechuraba, Pincoya. Estudio para la Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias S.A. EMOS, Filial CORFO. 1993.
- Ayala, Cabrera y Asociados Ltda.(AC 2000) Ingenieros Consultores. Análisis de la Contaminación de Aguas Subterráneas en la Región Metropolitana, por Aguas Servidas. Estudio N° 22-0023-05/98 para la Comisión Nacional del Medio Ambiente. 1999.
- Baechler, Jorge. Modelación Conjunta de los Sistemas Superficial y Subterráneo en la cuenca de Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, 1991.
- Carrasco, Rodrigo. Estimación de los Montos de Recarga del Acuífero Santiago Norte, apoyándose en Metodologías Hidrogeoquímicas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, en elaboración, 2004.
- Espinoza, Carlos. Propiedades Físicas del Agua Subterránea y Acuíferos II, Apuntes de Clases del curso CI51J, Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento. Universidad de Chile, 2004.
- Falcón, E., Castillo, O., Valenzuela, M. Hidrología de la Cuenca de Santiago. Publicación Especial N°3. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. 1970.
- Gonzalez, Rodrigo. Modelación Hidrológica de Los Acuíferos del Valle del Río Maipo en el Gran Santiago y sus Alrededores. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, 1999.
- Instituto Geográfico Militar. Geografía de Chile., Tomo Región Metropolitana de Santiago.
- Iriarte, Sergio. Estudio Hidrogeológico e Hidrogeoquímico del Acuífero de la Zona Norte de Santiago. Tesis para optar al grado de Magíster. Universidad de Waterloo. 2003.
- Ramírez, Jorge. Comparación de Técnicas de Vulnerabilidad. Tesis para optar al grado de Magíster. Universidad de Chile. En preparación, 2004
- Rojo, Nicolás (Rojo 2004). Modelo de Simulación de Recarga del Acuífero Norte de la Ciudad de Santiago. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, 2004.
- Toro, Patricia (Toro 2003). Evaluación del Riesgo de Contaminación de la Parte Norte del Acuífero de Santiago. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. 2003.