

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

SECCIÓN DE POSTGRADO



**MODELAMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE LA
VARIACIÓN HIDROGEOLÓGICA ESPACIAL DEL
ACUÍFERO LA YARADA-TACNA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON
MENCION EN INGENIERÍA HIDRÁULICA**

AUTOR: ING. HUGO AMADO ROJAS RUBIO

Asesor: MSc. Ing. Sebastián Santayana Vela

LIMA - PERU

2008

**MODELAMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN
HIDROGEOLÓGICA ESPACIAL DEL ACUÍFERO LA YARADA-TACNA**

ING. HUGO AMADO ROJAS RUBIO

Presentado a la sección de Postgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, en cumplimiento
parcial de los requerimientos para optar el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA HIDRÁULICA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Junio del 2008

© 2008, Universidad Nacional de Ingeniería, todos los derechos reservados

Autor:

HUGO AMADO ROJAS RUBIO

Facultad de Ingeniería Civil

Junio del 2008

Recomendado por:

M.Sc. Sebastián Santayana Vela

Profesor de Postgrado

Asesor de Tesis

Aceptado por:

Dr. Ing. José Carlos Matías León

Jefe de la Sección de Postgrado

Dedicatoria

A mis padres Manuel Trinidad y Rosa Donatila, por el esfuerzo realizado en mi educación. Sus invaluables consejos, ideales y principios contribuyeron en mi formación personal y profesional; por lo cual estoy eternamente agradecido.

A mi esposa Marlenee Silva, mis hijos Kevin y Boris, por su comprensión y apoyo brindado en todo momento, que me inspiraron confianza y perseverancia para el logro de mis metas trazadas.

Agradecimientos

Expreso sincero agradecimiento a mi asesor y amigo M.Sc. Ing. Sebastián Santayana Vela, por el apoyo y guía en la elaboración del presente trabajo, demostrando su capacidad profesional y docente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC, por el apoyo brindado en la realización del presente trabajo, incentivando de este modo la investigación en el país.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil, por el apoyo brindado en la subvención de la Tesis y a mis profesores de Postgrado, por la difusión de los conocimientos adquiridos y contribuir al desarrollo de la ingeniería nacional.

A mis amigos de la Maestría Elsa Minaya, Marcel Pérez, Mario García, Lidia Malpica, Duberly Huisa, Jaime Casafranca, por su amistad sincera; y a todas las personas que de algún modo han hecho posible la realización del presente trabajo.

Al Ing. Mario Aguirre Núñez, Jefe de Recursos Hídricos del INRENA, quién me facilitó la información disponible del acuífero La Yarada para la elaboración del presente estudio. Asimismo, a la Sra. Marisol Muñoz y José Toledo, por su apoyo en las coordinaciones de la investigación y por su amistad.

HUGO AMADO ROJAS RUBIO

MODELAMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN HIDROGEOLÓGICA ESPACIAL DEL ACUÍFERO LA YARADA-TACNA

INDICE

INDICE	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE CUADROS	XII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XVI

	Página
CAPITULO I INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II ANTECEDENTES	
2.1 Evolución de los modelos matemáticos para el estudio del flujo subterráneo	6
2.1.1 Modelos de agua subterráneas	7
2.1.2 Modelos matemáticos en aguas subterráneas	8
2.1.3 Proceso de calibración y simulación	10
2.2 Estudios hidrogeológicos del acuífero La Yarada	11
2.3 Casos de modelamiento de acuíferos	17
CAPITULO III MARCO TEÓRICO	
3.1 Conceptos básicos	20
3.2 Ecuación diferencial del flujo en medios porosos	22
3.3 Métodos numéricos de solución	23
3.3.1 Método numérico de diferencias finitas	24
3.3.2 Aplicación de las diferencias finitas al estado permanente	26
3.3.3 Acuífero no confinado o libre	29
3.4 Intrusión marina	30
3.4.1 Posición de la cuña de agua salada en ausencia de mezcla	32
3.4.2 Inclinación de la interfase	34

3.4.3	Interfase dinámica	36
3.4.4	Formula de Hubbert	37
3.5	Construcción y utilización de un modelo	38
3.5.1	Toma de datos físicos	38
3.5.2	Preparación y ajuste del modelo	39
3.5.3	Calibración y simulación del modelo	44
CAPITULO IV DATOS RECOLECTADOS		
4.1	El sistema acuífero de La Yarada	47
4.1.1	Características geométricas y litológicas del acuífero	47
4.1.2	La napa subterránea	54
4.2	Explotación de las aguas subterráneas	58
4.3	Hidrodinámica	60
4.4	Hidrogeoquímica	64
4.5	Balance hídrico del reservorio acuífero	64
4.5.1	Ecuación del balance	64
4.5.2	Cálculo del balance	65
4.6	Reservas del acuífero	68
CAPITULO V MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS		
5.1	Alcances y procedimientos	70
5.1.1	Alcances	70
5.1.2	Procedimientos	71
5.2	Descripción general del área de estudio	71
5.2.1	Características generales de la zona	71
5.2.2	El sistema acuífero La Yarada	77
5.3	Descripción del modelo Visual Modflow	79
5.4	Construcción del modelo de flujo	82
5.4.1	Capas de la superficie y elevación	82
5.4.2	Diseño de la malla	84
5.4.3	Parámetros hidráulicos	86
5.4.4	Condiciones de frontera	88
5.5	Calibración del modelo	92
5.6	Simulación del acuífero	94

CAPITULO VI RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1	Resultados del modelamiento	97
6.2	Resultados de la simulación de hipótesis	105

CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	Conclusiones	113
7.2	Recomendaciones	115

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.	117
----------------------------	---	-----

ANEXOS:

ANEXO 1	Variación de los niveles freáticos de la red piezométrica del acuífero La Yarada (1988 – 2002).
ANEXO 2	Caudal de explotación en el acuífero La Yarada, Junio de 1988.
ANEXO 3	Caudales de explotación históricos en La Yarada periodo (1976-1995)
ANEXO 4	Resultados de la calibración del modelo.
ANEXO 5	Panel fotográfico.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Proceso de calibración y simulación de un modelo matemático.
- Figura 2.2 Ubicación del acuífero La Yarada en la Región Tacna.
- Figura 3.1 Esquema de los tipos de acuíferos.
- Figura 3.2 Representación geométrica de aproximación por diferencias finitas.
- Figura 3.3 Mallado de celdas rectangulares en un modelo de diferencias finitas.
- Figura 3.4 Representación esquemática de un acuífero no confinado o libre.
- Figura 3.5 Desplazamiento de la cuña marina hacia el continente, donde se aprecia la zona de mezcla agua dulce y agua salada.
- Figura 3.6 Equilibrio de agua dulce y agua marina según Ghyben-Herzberg.
- Figura 3.7 Influencia de la descarga de agua dulce a velocidades crecientes.
- Figura 3.8 Inclinación de la interfase agua dulce y agua salada.
- Figura 3.9 Discretización del acuífero en una malla rectangular.
- Figura 3.10 Tipos de condiciones de borde.
- Figura 4.1 Geoforma, y litología del acuífero La Yarada.
- Figura 4.2 Perfil litológico del pozo IRHS - 90.
- Figura 4.3 Sectores de parámetros hidráulicos T, K S en el área del acuífero.
- Figura 5.1 Plano de los límites del acuífero de las Pampas de La Yarada y Hospicio.

- Figura 5.2 Esquema del Visual Modflow para la entrada de datos de pozos.
- Figura 5.3 Pantalla del Visual Modflow, con los módulos Input, Run y Output.
- Figura 5.4 Despliegue del módulo Input para el ingreso de datos.
- Figura 5.5 Mapa base para la modelación del acuífero.
- Figura 5.6 Superficie del terreno y del basamento acuífero tridimensional.
- Figura 5.7 Sección transversal en la fila 280, mostrando el modelo de acuífero libre de una sola capa.
- Figura 5.8 Detalle de la malla discretizada en el modelo.
- Figura 5.9 Distribución de la conductividad hidráulica en el modelo.
- Figura 5.10 Curvas equipotenciales de los niveles piezométricos iniciales (1988).
- Figura 5.11 Ubicación de los límites hidráulicos del modelo en el acuífero La Yarada.
- Figura 5.12 Ubicación de los pozos de bombeo en el modelo.
- Figura 5.13 Error residual y máximo cambio de carga vs el número de iteraciones.
- Figura 6.1 Balance de entradas y salidas de flujo en el acuífero.
- Figura 6.2 Ajuste de los niveles piezométricos observados y calculados.
- Figura 6.3 Líneas equipotenciales y dirección del flujo en el modelo acuífero La Yarada.

- Figura 6.4 Comparación entre las líneas equipotenciales observadas y calculadas en el modelo.
- Figura 6.5 Pozos IRHS 35, 37 y 206, con influencia de la intrusión marina. Cota piezométrica -0.50 m.s.n.m. (Sección transversal en columna 47 del modelo).
- Figura 6.6 Pozo IRHS 47, afectado por intrusión marina y pozo IRHS 63, no afectado. (Sección transversal en fila 311 del modelo).
- Figura 6.7 Comparación entre las líneas equipotenciales, calibrado y simulado según hipótesis 1.
- Figura 6.8 Balance de entrada y salida de flujo en el acuífero, según hipótesis 1.
- Figura 6.9 Comparación entre las líneas equipotenciales, calibrado y simulado según hipótesis 2.
- Figura 6.10 Balance de entrada y salida de flujo en el acuífero, según hipótesis 2.
- Figura 6.11 Comparación entre las líneas equipotenciales calibrado y simulado, según hipótesis 3.
- Figura 6.12 Balance de entrada y salida de flujo en el acuífero, según hipótesis 3.

LISTA DE CUADROS

- Cuadro 2.1 Ventajas e inconvenientes de los métodos diferencias finitas y elementos finitos.
- Cuadro 4.1 Profundidad de perforación de pozos y del basamento acuífero (1988).
- Cuadro 4.2 Litología del acuífero La Yarada.
- Cuadro 4.3 Nivel estático de la napa freática (junio 1988).
- Cuadro 4.4 Explotación de agua subterránea, periodo 1962 – 1995.
- Cuadro 4.5 Variación del volumen de explotación de pozos La Yarada (2003)
- Cuadro 4.6 Parámetros hidráulicos T, K y S del acuífero La Yarada.
- Cuadro 4.7 Balance hidrológico en la zona de estudio, en MMC/Año (Periodo1965/1994).
- Cuadro 4.8 Balance hídrico reservorio acuífero del río Caplina, La Yarada –Tacna.
- Cuadro 5.1 Elementos meteorológicos, estación Calana (Periodo 1965/1994).
- Cuadro 5.2 Precipitación total media anual de las sub cuencas del área de estudio (método de isoyetas). Periodo 1965/1994.
- Cuadro 5.3 Evapotranspiración real, total media anual (periodo 1965/ 1994).
- Cuadro 5.4 Valores de conductividad hidráulica K, almacenamiento S_s , producción específica S_y .
- Cuadro 5.5 Potenciales impuestos al modelo del acuífero La Yarada.

Cuadro 5.6 Parámetros utilizados para la solución del modelo.

Cuadro 6.1 Valores de la recarga del acuífero en m³/d.

Cuadro 6.2 Valores de conductividad hidráulica asignados en m/s.

RESUMEN

El presente estudio realizado en el acuífero La Yarada, en el Departamento de Tacna, tiene como objeto modelar en régimen permanente el acuífero y luego simular su comportamiento bajo diferentes hipótesis de explotación con la finalidad de determinar la variación espacial del nivel estático del agua subterránea y determinar la evolución del riesgo de intrusión marina en el acuífero, el cual constituye un problema en la actualidad.

El modelo de flujo del agua subterránea en este estudio, fue desarrollado usando el MODFLOW del USGS (U.S. Geological Service), compilado en la adaptación comercial por el Waterloo Hydrogeologic Inc., llamado Visual MODFLOW versión 3.1; por el cual se construye un modelo de flujo tridimensional de diferencias finitas del agua subterránea.

El área de la región simulada es de 845.98 km². Se consideró un modelo de una sola capa con celdas de 100 m x 100 m, en las zonas de mayor explotación del acuífero, con un espaciamiento irregular de la malla, presentando una disposición final de 456 filas por 430 columnas. El modelo fue diseñado en condiciones de flujo permanente con datos del nivel freático medidos en Junio de 1988, siendo el caudal de explotación estimado en 165,743 m³/d, o el equivalente a 2.75 m³/s.

Los niveles de agua subterránea fueron estimados durante el proceso de calibración del modelo y comparados con los medidos en los pozos de observación en 1988. El modelo fue calibrado usando un ajuste de parámetros manual de ensayo-error. Los ajustes fueron hechos a parámetros incluyendo los valores de razón de recarga y la conductividad hidráulica hasta que la calibración limite fue encontrada. Se obtuvo un error normalizado de la raíz media cuadrática de los niveles NRMS de 0.06356 (6.356%), observándose un mayor ajuste en los pozos ubicados en la zona de La Yarada (zona de mayor interés de la investigación) y una mayor dispersión en la zona de los Asentamientos, ubicada próxima a Tacna y Santa Rosa, cerca a la frontera con Chile.

Los resultados muestran que la dirección principal del flujo patrón del agua subterránea sigue la dirección Noreste a Suroeste en casi toda el área, a excepción de la zona de Santa Rosa, en la frontera con Chile, en donde se desplazaría hacia el Sur, en dirección al Océano Pacífico; no siendo posible establecer una dirección preferencial debido a la falta de información en esa área.

En la simulación del acuífero se ha planteado 3 hipótesis de explotación. La primera, considera un caudal de explotación de 3,358 l/s, en 86 pozos de bombeo localizados en 5 sectores; la segunda, con un caudal de 1,985 l/s; y la tercera, con un caudal de 1,379 l/s. En todos los casos se mantiene constante los valores de la recarga al acuífero.

De los resultados obtenidos de la simulación hidráulica, se aprecia para la primera hipótesis un flujo de agua del mar hacia el acuífero en las zonas del Litoral y La Yarada, estimado en 37,642 m³/d, evidenciando el fenómeno de intrusión marina en el acuífero. En la segunda hipótesis, los niveles de la napa freática ascienden entre 2 y 4 m, en la zona de La Yarada; en los Asentamientos, el nivel se incrementó entre 7 y 8.5 m; y, al sur, en el sector Los Palos, se observó que el nivel freático asciende 1.5 m, respecto al estado inicial. Los resultados de la a tercera hipótesis muestran que la curva piezométrica de nivel 0.00 m.s.n.m., se desplaza muy próxima a la línea de playa, no presentándose flujo de agua de mar hacia el acuífero. Esta hipótesis se presenta como una alternativa aceptable para el control de la intrusión marina y la preservación del recurso hídrico.

Respecto a la interfase de la cuña marina según la condición de Ghyben-Herzberg, se concluye que para la primera hipótesis se encuentra localizada a una profundidad entre 8.80 y 56.40 m, en el sector del Litoral y La Yarada; entre 11.60 y 123.20 m, para la segunda hipótesis, y entre 21.20 y 204 m de profundidad, para la tercera hipótesis de explotación; presentando, para la última consideración, el riesgo de contaminación por agua de mar sólo en pozos del sector del Litoral y La Yarada, localizados muy próximos a la línea de playa.

ABSTRACT

The objective of the following research which took place in the aquifer La Yarada in the department of Tacna, is to mold the aquifer under permanent regime and simulate different conditions to determine the variability on the static level of the groundwater and the risk evolution of the sea water intrusion in the aquifer which is so far a current problem.

The designed groundwater flow model in this research, was developed using the MODFLOW from USGS (U.S. Geological Service) compiled in the Waterloo Hydrogeologic Inc. issue called Visual MODFLOW version 3.1 which builds to design a three-dimensional finite difference groundwater flow model.

The area of the simulated region is 845.98 km². It was considered a single layer model with 100 m x 100 m cells in the zones where the aquifer is exploited the most with an irregular spreading on the mesh leading to 456 rows x 430 columns.

The model was designed in a steady flow condition with data from the phreatic level taken in June of 1988, with and exploited flow rate of approximately 165,743 m³/d or 2.75 m³/s.

The groundwater level was estimated during the calibration process of the model and compared which those estimated in the well in 1988. The model was calibrated following using a Trial and error adjustment. The adjustment was made keeping in mind the hydraulic recharge and conductivity until the calibration was found.

The percentage of error standard of the root mean square level (NRMS) was estimated in 0.06356 (6.356%) having a higher adjustment on those zones near La Yarada and a higher dispersion on the zone next to Tacna and Santa Rosa close to the border with Chile.

The results shows that the main flow direction is from northeast to southeast in almost all the area with the exception of Santa Rosa in the border with Chile where it would go to the south to the Pacific Ocean which makes impossible to settle a direction due to the lack of information.

In the simulation related to the aquifer it has been planned 3 exploitation hypothesis. The first one considers an exploitation flow rate of 3,358 l/s in 86 wells located on 5 sectors. The second one considers an flow rate of 1,985 l/s and finally the third one 1,379 l/s. In all cases remain constant values of the aquifer recharge.

The results of the hydraulic simulation for the first hypothesis are estimated in 37,642 m³/d of sea water flow to the aquifer leaving evidence of the phenomenon of sea water intrusion. The second hypothesis shows that the level of the phreatic water rise from 2 to 4 m in La Yarada, from 7 to 8.5 in the Asentamientos and finally 1.5 m in the sector Los Palos.

The third hypothesis shows that the piezometric curve at 0.00 meters above sea level displaces close to the shore line, getting no sea water flow into the aquifer. This hypothesis is presented as an alternative to the control of the sea water intrusion and the preservation of water resources.

It is concluded to the issue related to the interface of the sea wedge according to the Ghyben – Herzberg that the first hypothesis located in a depth between 8.80 and 56.40 m in the sector of the Littoral and La Yarada, the second one in a depth between 11.60 and 123.20 m and the third one in a depth between 21.20 and 204 m representing to the last estimation the risk of pollution by sea water intrusion to the wells of Littoral and La Yarada located close to the shore line.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La planificación y gestión de los recursos hídricos subterráneos, así como la protección del acuífero de La Yarada dependen de la competencia para cuantificar el comportamiento espacial y temporal de las aguas subterráneas. Esta cuantificación puede ser realizada de diversas maneras, tanto por mediciones de campo como por modelamiento matemático.

El estudio por mediciones de campo es más directo y normalmente puede demostrar ser más acertado, sin embargo, pocas veces es utilizado con exclusividad debido a su costo y largos plazos de evaluación (el movimiento del agua subterránea es muy lento, pudiendo requerir varios años para caracterizar su comportamiento), como lo es el fenómeno de la intrusión marina en los acuíferos aluviales costeros, o en algunos casos hasta su inaplicabilidad.

A diferencia de algunos años atrás, cuando ejemplos de modelación matemática se encontraban apenas en artículos de investigación, hoy en día es una herramienta de ayuda para solucionar problemas de aguas subterráneas. De hecho, es difícil encontrar un estudio del flujo de aguas subterráneas, que no utilice de alguna forma un modelo matemático.

Es conocido que el recurso hídrico es un factor determinante en el desarrollo de los pueblos, por lo que se hace necesario su manejo adecuado para la preservación, tanto en cantidad como en calidad. Esta situación se presenta al sur de nuestro País, en el Departamento de Tacna; en el cual la oferta actual del recurso no abastece en forma satisfactoria las demandas totales.

La sobreexplotación, de la que ha sido objeto el acuífero de La Yarada, y la planificación deficiente de los sistemas de los proyectos de riego, favorecido por periodos de sequía extrema en el ciclo hidrológico, ha originado un gradual y permanente descenso de la napa freática, comprometiendo sus reservas no renovables e influenciando el riesgo de la intrusión marina.

El objetivo principal de la presente investigación es evaluar la variación espacial y temporal del acuífero La Yarada, mediante la simulación del mismo, para diferentes hipótesis y situaciones futuras de explotación, frente al déficit de escorrentía superficial existente; asimismo, analizar el riesgo de intrusión marina y el avance de la interfase agua dulce y agua salada hacia el acuífero.

La investigación pretende contribuir al conocimiento de la hidrogeología de los acuíferos costeros, a fin de plantear estrategias y desarrollar alternativas que permitan controlar el proceso dinámico de la intrusión marina. Asimismo, mitigar el impacto de este fenómeno en la salud, medio ambiente y desarrollo de la región.

En el *Capítulo 2 Antecedentes*, se presenta la información referente a los modelos para el estudio del flujo del agua subterránea, el procedimiento y las técnicas de construcción y calibración de los modelos matemáticos, así como también los estudios hidrogeológicos e investigaciones realizados para el conocimiento del acuífero La Yarada.

El *Capítulo 3 Marco Teórico*, explica inicialmente la formulación de la ecuación diferencial del flujo del agua subterránea, las técnicas de solución por el método numérico de diferencias finitas, el proceso de la intrusión marina del agua salada hacia el acuífero, así como también la construcción del modelo conceptual, su discretización, asignación de condiciones de frontera y los criterios para la calibración del modelo.

En el *Capítulo 4 Datos Recolectados*, se describe el modo en que se obtuvieron cada uno de los datos necesarios para la construcción del modelo acuífero La Yarada. Los estudios hidrogeológicos realizados, las mediciones de campo efectuados para evaluar la variación espacial y temporal de la napa freática, así como la estimación de la recarga y reserva del agua subterránea del acuífero constituyen datos esenciales para la ejecución del modelo. Asimismo, se determina el caudal de explotación del acuífero en Junio de 1888, estimado en 55,136,030.40 m³/año. De igual modo, los parámetros hidráulicos

del acuífero, como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, son analizados para su utilización posterior.

El *Capítulo 5 Materiales y Procedimientos*, presenta los alcances y aplicabilidad de la investigación, la descripción de la zona de estudio, características generales de la geoforma del acuífero, las acciones actuantes en el sistema como la precipitación, evaporación, recarga, explotación del acuífero. Asimismo, se realiza una descripción del modelo Visual MODFLOW, utilizado para la simulación del acuífero en régimen permanente, el procedimiento del ingreso de datos físicos de campo al modelo, los criterios para la discretización de la malla, importación de las capas del acuífero al modelo, la asignación de las condiciones de frontera y los límites hidráulicos impuestos al modelo; así como también la construcción del modelo, calibración y el método numérico usado para la solución de la ecuación del flujo.

En el *Capítulo 6 Resultados, Análisis y Discusión*, se presenta el análisis de la construcción del modelo según los datos obtenidos del capítulo anterior, se analiza los resultados de la calibración del modelo y el ajuste de los las cargas piezométricas medidas en los pozos de observación con los obtenidos mediante cálculo por el modelo y se evalúa el patrón de flujo resultante. En esta etapa, manteniendo constante la recarga se discuten los resultados de las hipótesis de simulación del modelo, el cual estará en función del caudal de explotación del acuífero; analizando las tres hipótesis planteadas, se determina que el caudal de explotación de 1,379 l/s se presenta como una alternativa aceptable para el control de la intrusión marina.

Finalmente en el *Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones*, se presentan las conclusiones a las cuales se ha llegado con los resultados obtenidos de la calibración del modelo y de las hipótesis de simulación planteadas, asimismo, se formulan las recomendaciones para la realización de estudios que continúen y/o profundicen la investigación sobre el tema.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

CAPITULO II

ANTECEDENTES

2.1 Evolución de los modelos matemáticos empleados para el estudio del flujo subterráneo

A partir de 1960, el empleo de los métodos numéricos alcanza gran desarrollo debido al uso cada vez más creciente de las computadoras, lo cual hace que estos métodos sean mayormente aplicados en problemas de flujo con resultados confiables.

Los modelos matemáticos permiten la solución de las ecuaciones que rigen el movimiento del agua subterránea en el contexto de las particularidades geométricas, hidrológicas e hidrogeológicas en las condiciones de frontera y de explotación que caracterizan al acuífero en su concepción regional.

Al no existir una solución analítica general para la solución de este problema, los modelos matemáticos se basan en la aproximación discretizada, que permite formular de forma general el cálculo numérico de la solución de dicho problema. Su expresión se hace particular con la introducción de las restricciones impuestas por la realidad física del acuífero y los criterios del profesional. Las técnicas empleadas en la solución de las ecuaciones de flujo de agua en medios porosos, en la mayoría de estos modelos se basan en el método de diferencias finitas, utilizando mallas rectangulares o cuadradas.

Asimismo, la técnica de elementos finitos, utilizando mallas triangulares, es una herramienta muy importante y también de gran uso en la actualidad. Fue aplicado por vez primera por Zienkiewicz-Cheung (1966) para el estudio de campos potenciales en los problemas de flujo de fluidos. La aplicación del método de elementos finitos al flujo en medios porosos, también fue hecho por primera vez por los autores citados para flujo confinado y anisotrópico; mientras que el flujo libre es estudiada por Neuman-Witherspoon en 1970.

Las ventajas de cada método dependen de muchos factores, y en particular, de cual sea el problema en estudio. En el método de los elementos finitos pueden utilizarse menos nudos que con el de diferencias finitas, sobre todo con límites muy irregulares. La desventaja del primer método es que son más abstractos y no se logra ver intuitivamente el funcionamiento físico del sistema acuífero, conduciendo a una mayor dificultad en la detección de errores en la introducción de datos.

2.1.1 Modelos en aguas subterráneas

Bear J. (1987) define al modelo como una versión simplificada del sistema acuífero natural (agua subterránea) que simula aproximadamente una respuesta de lo que acontecerá en el futuro. De acuerdo a Castany G. (1978); construir un modelo es establecer primero las ecuaciones del fenómeno que se desea simular y luego estructurar un algoritmo de resolución de estas ecuaciones. Según Custodio E. y Llamas (1996) se entiende por modelo de un acuífero el procedimiento, ya sea analítico, matemático o analógico, que nos permite realizar la simulación de su comportamiento. Un modelo debe ser representativo del sistema real, debe reproducir los estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que las relacionan.

Para poder definir el movimiento del agua en un acuífero se necesita:

- a. Descripción de la geometría del acuífero.
- b. La descripción de las propiedades físicas del medio en cada punto del dominio: permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, porosidad.
- c. Las leyes que rigen el movimiento del agua en un medio poroso, tales como la ley de Darcy y de la conservación de la masa.
- d. Las condiciones de los límites y fronteras del sistema.
- e. La descripción de las acciones exteriores del sistema.

Entre los tipos de modelos de aguas subterráneas se tienen:

- 1) Modelos conceptuales: representación mental de la geología e hidrogeología del sitio como un grupo de unidades continuas.
- 2) Modelos matemáticos: analíticos y numéricos.
- 3) Modelos analógicos: modelos físicos, como los lisímetros, tanques, etc.

2.1.2 Modelos matemáticos en agua subterránea

Los modelos matemáticos, llamados también modelos digitales son técnicas que permiten reemplazar las ecuaciones de flujo por un sistema de ecuaciones lineales cuyas variables y solución son estimadas en un número finito de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. Este método puede utilizar aproximaciones numéricas, como por ejemplo el de diferencias finitas, al sustituir las derivadas por variaciones lineales de las variables en un intervalo finito. Otro método más refinado es el de elementos finitos, que consiste en la formulación del problema basándose en la teoría del cálculo variacional (Amisial y Jegat, 1976). En los modelos matemáticos, existen dos aproximaciones o métodos mediante los cuales puede resolverse la ecuación del flujo subterráneo. Cuadro 2.1

Cuadro 2.1

Ventajas e inconvenientes de los métodos diferencias finitas y elementos finitos

Método	Ventajas	Inconvenientes
Diferencias finitas	<ul style="list-style-type: none"> • Conservan la masa de agua • Intuitivo, simple, conocido y comprobado. Fácil de programar • Más programas disponibles en el mercado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Red rectangular necesaria para la discretización • Difícil adaptación a sistemas geológicos complejos • Pozos ocupan toda la celda
Elementos finitos	<ul style="list-style-type: none"> • Discretización mas versátil en zonas de interés solamente • Pozos son representados como nodos discretos • Buena adaptación a sistemas complejos 	<ul style="list-style-type: none"> • No intuitivo • Modelo matemático complejo • Conserva masa solo globalmente. Pueden ocurrir errores locales en el balance de masas

Cleary (1991), menciona que una gran mayoría de los modelos matemáticos de agua subterránea presentan estructura determinística. Relacionan causa y efecto de manera exacta, que generalmente involucran parámetros físicos-químicos que son características de acuíferos (conductividad hidráulica,

coeficiente de almacenamiento, dispersividad longitudinal y coeficiente de partición química).

Los modelos matemáticos son herramientas que ayudan a entender los procesos físicos, químicos y bioquímicos que se dan en el sistema de aguas subterráneas. (Franz y Guiguer, 1992). Los modelos de aguas subterráneas pueden ser agrupados ampliamente dentro de dos categorías: cantidad y calidad de agua.

En la categoría de cantidad de agua, los modelos son usados para:

- Administración de la reserva y mejora de la recarga del acuífero;
- Diseños de pozos y estudios de interferencia;
- Estudios de drenaje agrícola;
- Rendimiento óptimo del sistema;
- Estudio de filtraciones en presas;
- Estudios de interacciones de aguas subterráneas;
- Redes de flujo.

En la categoría de calidad de agua subterránea, los modelos numéricos o matemáticos son usados para:

- Estudiar las consecuencias de la contaminación de las aguas subterráneas;
- Necesidad de prevenir la contaminación y la planificación de medidas de corrección;
- Estudio del movimiento de contaminantes en acuíferos.

La ecuación diferencial que describe el movimiento del agua en un acuífero heterogéneo, anisotrópico y para flujo no permanente, se expresa por la siguiente ecuación diferencial, que considera las ecuaciones del flujo y conservación de la masa para simular el flujo de agua subterránea:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm Q = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.1)$$

Donde: K, permeabilidad o conductividad hidráulica, es función de (x, y, z).
 S_s , coeficiente de almacenamiento específico.
h, carga hidráulica en un punto (x, y, z) y en un instante t.
Q, caudal impuesto al sistema.

Asimismo, un modelo matemático incorpora los rasgos físicos del sistema natural como expresiones matemáticas, así:

- Geología \Rightarrow propiedades hidráulicas
- Fuentes \Rightarrow condiciones de frontera
- Observaciones \Rightarrow parámetros de calibración.

2.1.3 Proceso de calibración y simulación

Tal como se ha mencionado, un modelo numérico es una simplificación de una situación real que se conoce puntualmente a través de un número limitado de datos que representa el modelo hidrogeológico conceptual planteado. Por otra parte, si se conoce exactamente la situación real, no sería justificable ni posible reproducirla exactamente en el modelo. La validez de la simplificación depende del objetivo que se pretende conseguir con el modelo. El proceso a seguir en una modelación se muestra en la figura 2.1.

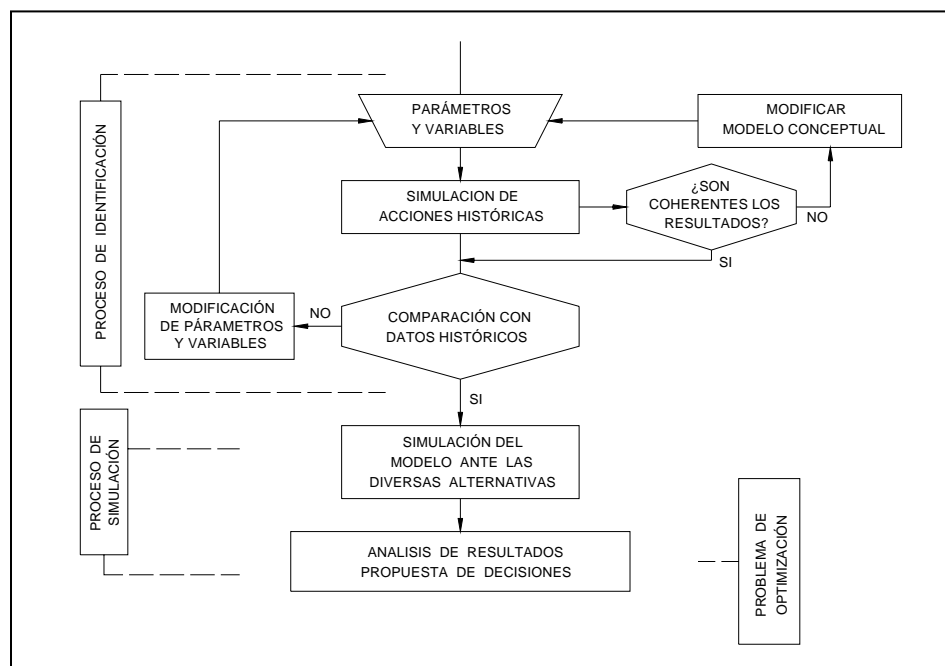


Figura 2.1 Proceso de calibración y simulación de un modelo matemático (tomado de Custodio y Llamas)

Se observa que de la situación real a través de los estudios hidrogeológicos, se pasa a un modelo conceptual de acuerdo al objetivo y a las necesidades de simulación, optándose por elegir el método operativo. En general, los parámetros que interesa conocer al modelar un acuífero, son la evolución de los niveles y la velocidad del flujo en un conjunto de puntos representativos del mismo. Por tanto, para modelar matemáticamente un acuífero se precisan las siguientes etapas:

1. Planteamiento de hipótesis para la descripción del medio continuo constituido por el acuífero, mediante un número finito de elementos que lo representen adecuadamente.
2. Definición de un proceso matemático que describa las leyes que regulan el movimiento del flujo en el acuífero.
3. Sobre la base de las hipótesis, definición de un proceso numérico de cálculo que permita resolver las ecuaciones del flujo, y permita obtener los valores de los parámetros objetivos a lo largo del tiempo, para unas acciones externas aplicadas.

2.2 Estudios hidrogeológicos del acuífero La Yarada

Antecedentes

El primer esfuerzo por conocer la realidad de la explotación de aguas subterráneas en el valle de Tacna, fue realizado por la Dirección General de Aguas y Suelos (DGAS) del Ministerio de Agricultura en 1971. El estudio hidrogeológico de las Pampas de La Yarada y Hospicio, inventarió 109 fuentes de agua subterránea, con un volumen explotado de 27 MMC, con los cuales se irrigaba 2,000 ha. Luego en 1985, la Corporación de Desarrollo de Tacna (CORDETACNA) inventarió 222 fuentes, distribuidas en los distritos de Pachía, Calana, Pocollay y Tacna.

En 1996, el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) realizó un reconocimiento situacional de algunos pozos y su ubicación en coordenadas UTM (en inglés, Universal Transverse Mercator), del sistema geodésico WGS84, tomando como base la información del último inventario de fuentes de agua subterránea, realizado en 1988 por el Programa Nacional de Aguas

Subterráneas y Tecnificación de Riego (PRONASTER), en el que se registró 238 fuentes. Es así que se normalizó el inventario de recursos hídricos subterráneos (IRHS).

Hasta 1996, de las 238 fuentes inventariadas, sólo 111 estaban siendo utilizadas; de los cuales 4 son naturales (manantiales) y 107 artificiales (pozos). En la zona de estudio, 151 pozos son tubulares con diámetros de 4", 15", 18", 21"; y 83 pozos son a tajo abierto revestidos de concreto, ladrillo, etc., con diámetros que varían entre 1.5 y 3 m.

Para la determinación de las características hidráulicas (transmisividad, coeficiente de almacenamiento y permeabilidad) del acuífero La Yarada-Hospicio, se realizaron una serie de pruebas de bombeo. Desde 1971 hasta 1996, se realizaron 85 pruebas de bombeo a caudal constante, la mayoría con pozos de observación (piezómetros); en sus fases de descenso y recuperación.

Características generales del acuífero

Las Pampas de La Yarada y Hospicio en la región Tacna, son una zona principalmente agrícola que se abastece de agua subterránea, y cuya extracción corresponde al acuífero del mismo nombre. Se encuentra ubicado en la parte inferior de la cuenca del río Caplina, que forma parte del Sistema Hidrográfico del Océano Pacífico (Fig. 2.2).

Según estudios del INRENA, en 1996, en base al plano geológico elaborado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET); el acuífero de La Yarada constituye un gran reservorio de aguas subterráneas, formado por procesos tectónicos y sedimentarios, conformando una fosa tectónica de 560 km² de superficie, aproximadamente, y varios cientos de metros de profundidad y constituido por multicapas en el cual se ha determinado dos acuíferos productores, del que sólo se conocen las características del acuífero superficial (acuífero libre). Estudios preliminares han determinado que tiene su fuente de alimentación en la infiltración del río Caplina, Vilavilani, quebrada Cauñani, quebradas Viñani y Escritos entre los principales.

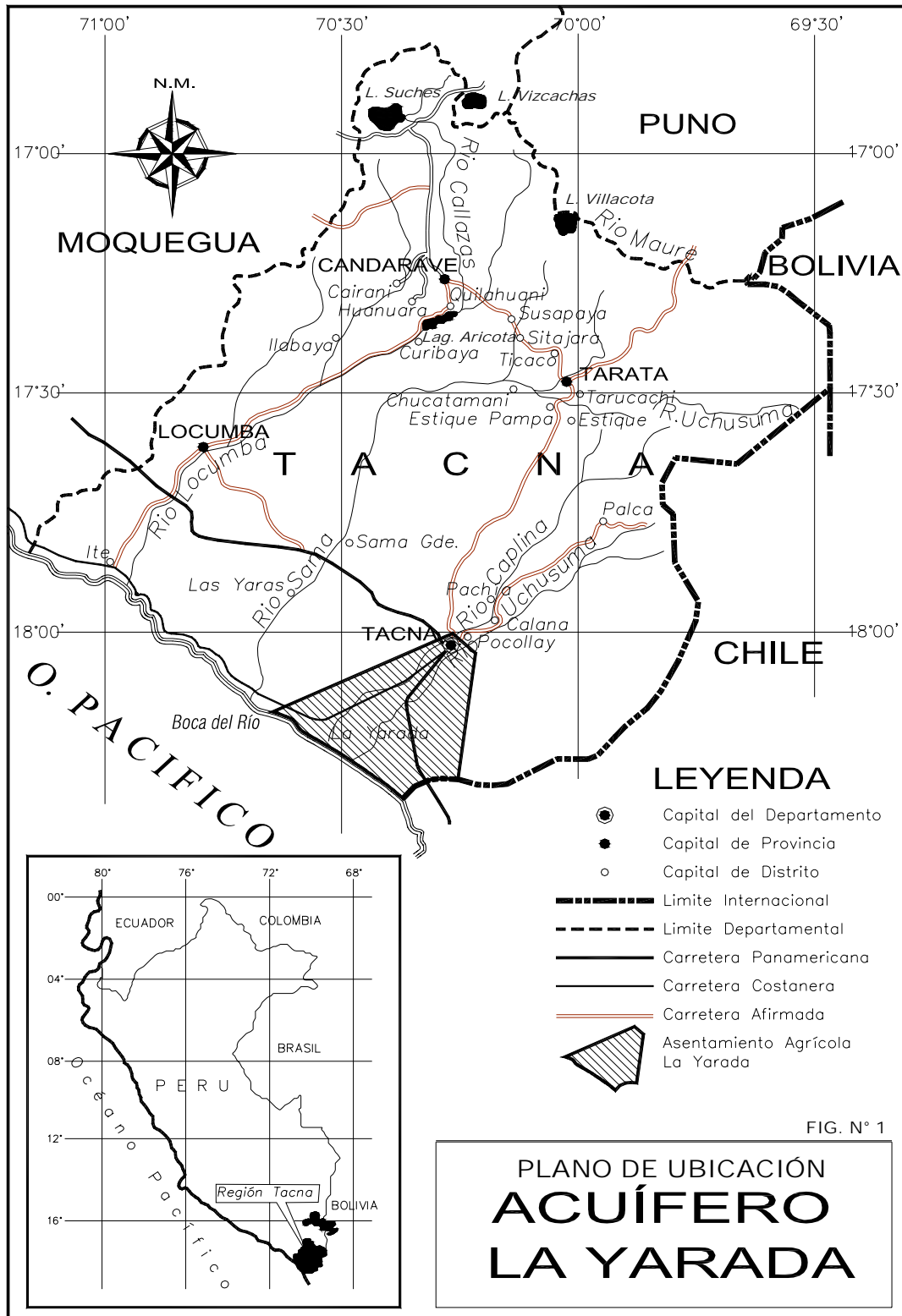


Figura 2.2 Ubicación del acuífero La Yarada en la Región Tacna

El acuífero La Yarada se ha constituido en uno de los más estudiados a nivel nacional, habiendo sido objeto de diversas investigaciones especializadas: geología, hidrogeología e hidrología, pese a ello no se ha concluido en un estudio definitivo integral, bajo el no tan reciente marco conceptual del manejo a nivel de Cuenca Hidrográfica, o el nuevo concepto de Gestión Social de Cuenca Hidrográfica.

Según el Estudio Hidrogeológico de las Pampas de La Yarada y Hospicio de Tacna (1,996) aprobado por el INRENA, aún no se ha establecido la geometría del acuífero, por ende tampoco se conoce plenamente las características hidrogeológicas e hidráulicas, por lo que no se puede determinar certeramente el potencial hídrico superficial ni profundo.

Situación del acuífero de La Yarada

1. La infraestructura constructiva de los 124 pozos en explotación, se halla mayoritariamente en mal estado, en parte, porque un alto porcentaje ha cumplido su vida útil (25 años) y fueron afectados por el terremoto del 2001, por su ineficiencia constructiva, o por el mal dimensionamiento de los equipos de bombeo. Estas situaciones traen como consecuencia la inseguridad y el mal funcionamiento de las bombas, convirtiendo a dichos pozos en fuentes ineficientes y con altos costos operativos.
2. El volumen estimado de explotación anual para el 2003, es de 65.37 millones de metros cúbicos (MMC), equivalentes a 2.016 m³/s, oscilando los caudales de operación de cada uno de los pozos existentes entre 0.80 l/s (uso poblacional) a 104 l/s (uso agrícola), según la campaña de monitoreo efectuada por el INRENA y la Administración Técnica del Distrito de Riego de Tacna (ATDR-Tacna) en el 2003.
3. Las características fisicoquímicas del agua subterránea, según los estudios realizados, demuestran la existencia de aguas con un considerable contenido de sales en la mayoría de pozos, cuyos valores superan los límites de "salinidad moderada" (hasta 0.75 mmhos/cm) para riego.

4. La calidad del agua se ha ido afectando por la formación de estrato salino de cloruro de sodio, por el problema de intrusión marina y por el proceso de aplicación de fertilizantes salinos que se concentran en el acuífero por percolación.
5. La deficiencia en la ubicación de pozos que provocan continuos descensos de la napa acuífera, especialmente en el sector de La Yarada Antigua y los pozos cercanos al litoral.
6. Explotación de pozos clandestinos a pesar de la resolución ministerial. N° 0696-98-AG, que prohíbe cualquier trabajo de perforación de pozos de explotación en las Pampas de La Yarada.

Modelamiento del acuífero

En el estudio hidrogeológico elaborado por el INRENA, en 1996, también se contempla el modelamiento del acuífero de La Yarada en régimen permanente en base al registro histórico de los niveles dinámicos y caudales de explotación para el 1995. El modelo matemático empleado fue el Flowpath, versión 3.0 de 1990, desarrollado por Nilson Guiguer & Thomas Franz del Waterloo Hydrogeologic Inc. de Canadá, que utiliza el método de las diferencias finitas para el análisis y resolución de la ecuación del flujo subterráneo.

Entre los resultados obtenidos para la simulación del acuífero a 1995 y condiciones futuras para 40 años (2035), que contempla la incorporación de recarga al acuífero proveniente de la implementación y consolidación futura del proyecto Vilavilani, para diferentes escenarios de explotación, se concluye en lo siguiente:

- Se estima que anualmente el nivel estático del acuífero desciende en promedio 0.30 m. a 0.40 m.
- Manteniendo el mismo régimen de explotación actual, se observa que para la condición futura con recarga, el acuífero presentaría una recuperación del nivel dinámico en promedio de 0.25 m.
- El ascenso esperado de 0.25 m estaría indicando un volumen de recarga del acuífero de 223.26 Hm^3 , del cual el volumen útil o aprovechable sería de 10.50 Hm^3 , equivalentes a 335.6 l/s.

- Como propuesta de control para detener la intrusión marina detectada al Noroeste del acuífero, para el régimen actual se plantea la reducción del caudal de explotación en el sector de la Yarada Baja, lo que llevaría a recuperar el nivel dinámico entre 0.5 m. y 1.00 m, en dicho sector.

Gestión del acuífero

El Estado Peruano a partir de 1989 y velando por la preservación, conservación y uso sostenible de los recursos subterráneos del acuífero de La Yarada, ha promulgado sendas Resoluciones Ministeriales dirigidas a regular el funcionamiento del acuífero, entre las que se tiene:

- Primera Resolución (R.M. N° 00555-89-AG-DGAS): prohíbe ejecutar obras destinadas a la explotación de aguas subterráneas, así como modificar los métodos y sistemas de explotación en las pampas de La Yarada.
- Segunda Resolución (R.M. N° 621-94-AG): autoriza al INRENA, a través de la Dirección General de Aguas y Suelos, a la prosecución y culminación del Estudio Hidrogeológico de las Pampas de La Yarada y Hospicio.
- Tercera Resolución (R.M. N° 0696-98-AG): de fecha 14 de diciembre de 1998, que da por concluido y aprueba el "Estudio Hidrogeológico de las Pampas de La Yarada y Hospicio"; asimismo se dispone mantener la veda sobre el incremento de explotación del agua subterránea, prohibiendo ejecutar todo tipo de obras destinada a la explotación de aguas subterráneas del acuífero de las Pampas de La Yarada y Hospicio, así como el incremento de los volúmenes actuales de explotación.
- Cuarta Resolución (R.M. N° 065-2006-AG): resuelve "Declarar de necesidad pública y preferente interés nacional la conservación y preservación del recurso hídrico del acuífero del valle del río Caplina el cual tiene una extensión de 916.53 km², asimismo considera mantener la veda sobre el incremento de explotación del agua subterránea del acuífero del valle del río Caplina, así como el incremento de los volúmenes actuales de explotación.

2.3 Casos de modelamiento de acuíferos

- a) En 1988, la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura (FAO), apoyó la realización de un estudio de las aguas subterráneas en el Perú, denominado "Simulación numérica de la napa freática del valle de Virú con fines de drenaje" (GCP/RLA/084/JPN-Documento de Campo), el mismo que fue presentado en el taller: "Preparación de las guías y manuales técnicos sobre prevención y combate de la degradación de tierras en el desarrollo de la agricultura con riego y drenaje en América Latina", realizado en Santiago de Chile, en septiembre de 1990.

El estudio constituye una aplicación de las técnicas de simulación de la napa freática mediante modelo matemático, para predecir fenómenos de ascenso del nivel freático y consecuente degradación de los suelos y de la calidad del agua subterránea, en la implementación y desarrollo de nuevos proyectos de riego.

La simulación fue realizada a través de la aplicación del método de Diferencias Finitas del modelo Visual MODFLOW para el periodo 1988-1994. Se simuló el impacto que experimentarían la napa freática de los valles de Chao (6,802 ha), Virú (12,645 ha) y Moche (20,081 ha), localizadas en la costa norte del Perú, y que; en los años sucesivos serían incorporadas al riego con aguas superficiales, como resultado del transvase de agua del río Santa, denominado Proyecto CHAVIMOCHIC (Chao, Virú, Moche y Chicama).

- b) García J, Heredia J, Murillo J, González A, con el difundido código en diferencias finitas MODFLOW, en la versión que integra el software Visual MODFLOW versión 2.81 (1999), evalúan los eventuales problemas de intrusión marina que pudieran presentar los escenarios modelados de la Unidad Hidrogeológica del río Verde, en la Provincia de Granada, España.

El acuífero ha sido objeto de estudio mediante la elaboración de varios modelos de flujo, previa calibración en distintos periodos de tiempo y con interesantes hipótesis de simulación. La investigación realizada se centró inicialmente en uno de los escenarios temporales aun no simulados como es el de la sequía 1990-1991 y 1993-1994, que es caracterizada y cuantificada. La fuerte reducción de las aportaciones pluviométricas y la

sobreexplotación que sufre el acuífero en dicho periodo se traduce en inestabilidades numéricas por el secado de celdas que impiden el desarrollo definitivo del modelo transitorio.

En la investigación se realiza finalmente una aproximación en régimen permanente, con simulación de las nuevas hipótesis de gestión para la recarga artificial mediante inyección de aguas residuales depuradas para frenar la intrusión marina, y se efectúa una aproximación al análisis del régimen hidrológico del acuífero de la posible construcción de un embalse en la cuenca alta del río Verde.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Conceptos básicos

Acuífero (palabra que proviene del latín aqua = agua y fero = llevar): estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas. Esto hace que el hombre pueda aprovechar el agua contenida en él en cantidades económicamente apreciables para cubrir sus necesidades. Ejemplos de este tipo de formación son los aluviones de los ríos (gravas y arenas), las areniscas poco cementadas, algunas rocas volcánicas, formaciones calcáreas muy karstificadas, etc.

Acuícludo (del latín claudere = encerrar): formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Un ejemplo de esta formación son las arcillas de origen deltaico o de estuario (contenido de agua superiores al 50 % en volumen). Los depósitos deltaicos son aquellos acumulados en la desembocadura de los ríos.

Acuitardo (del latín tardare = retardar): formación geológica que conteniendo agua en apreciables cantidades, la transmiten muy lentamente, por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones. Sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos que puede llegar a ser muy importante. Ejemplos de esta formación son las arcillas limosas o arenosas.

Acuífugo (de latín fugere = huir): son formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir. Ejemplos de estas formaciones son los macizos graníticos no alterados o las rocas metamórficas sin meteorización.

Tipos de acuíferos

1. Acuíferos libres, no confinados o freáticos: son aquéllos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto con el

aire y, por lo tanto, a presión atmosférica. Al perforar pozos en estos acuíferos que los atraviesen total o parcialmente, la superficie obtenida por los niveles de cada pozo forman una superficie real (Figura 3.1).

2. Acuíferos cautivos, confinados o a presión: son aquéllos en los que el agua está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de la formación geológica que lo contiene, saturándola completamente. Dentro de esta clasificación se denominan pozos surgentes o fluyentes aquellos en los cuales el nivel piezométrico está situado a una cota superior que la boca del pozo y pozos artesianos o a presión a aquellos en los que el nivel piezométrico quede por debajo de la superficie topográfica. Estos acuíferos poseen una superficie piezométrica ideal.
3. Acuíferos semiconfinados: son aquéllos acuíferos confinados en los cuales la superficie inferior y/o superior que los encierra no son completamente impermeables, sino acuitardos, permitiendo un paso vertical del agua entre ambos acuíferos y en uno u otro sentido, dependiendo de la diferencia de potencial entre ellos.

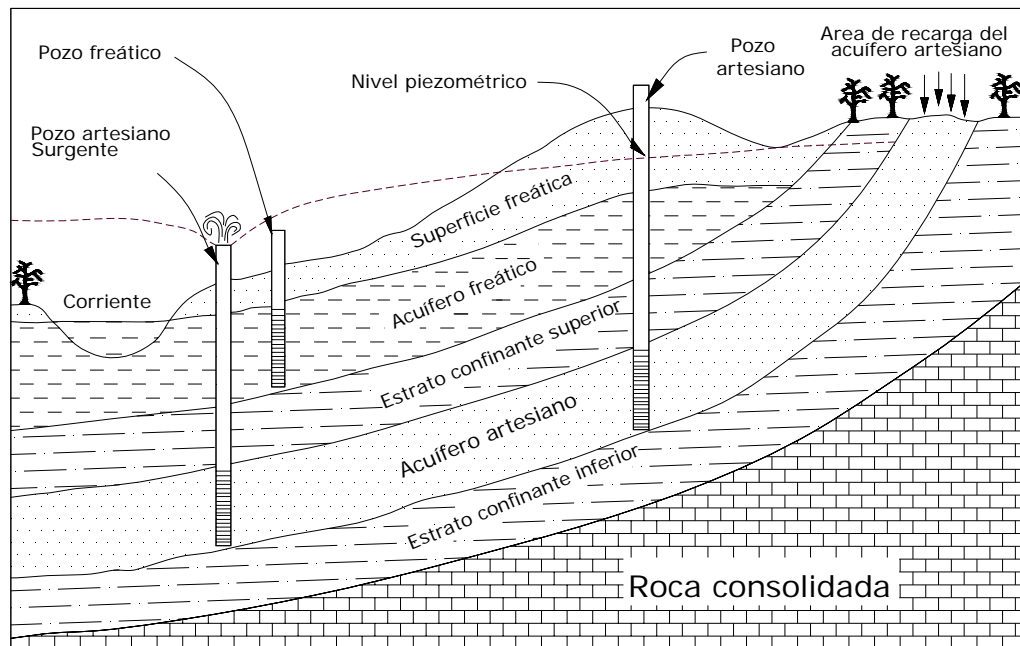


Figura 3.1 Esquema de los tipos de acuíferos (tomado de Castany G.)

3.2 Ecuación diferencial del flujo en medios porosos

La resolución de las ecuaciones diferenciales del flujo en medio poroso, requiere determinadas condiciones iniciales y de contorno para cada caso, y en general, sólo es posible su solución para acuíferos muy simples, homogéneos e isotrópicos. Las soluciones conocidas pertenecen a casos unidimensionales o bidimensionales, y aún así las fórmulas son de difícil manejo y a través de procesos de cálculo complicados. Por ello, en general se recurre al cálculo aproximado por métodos numéricos.

La presencia de una superficie libre supone una importante complicación porque es a la vez condición de contorno y solución. Afortunadamente, muchos casos prácticos admiten simplificaciones de forma tal de poder llegar a ecuaciones diferenciales más sencillas resolubles a veces por métodos analíticos.

La ecuación que regula el flujo bidimensional del agua en un acuífero saturado, anisotrópico es de la forma (Anderson y Woessner, p.13, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm Q(x, y) = S \frac{\partial h}{\partial t} + L \quad (3.1)$$

Donde:
$$L = -K_z \frac{h_{fuente} - h}{b}$$

Los términos del lado izquierdo de la ecuación 3.1, representan el flujo horizontal a través del acuífero donde h es el nivel piezométrico en el instante t , y T_{xx} , T_{yy} son las componentes de la función de transmisividad en un punto del acuífero de coordenadas rectangulares x e y . S , es el coeficiente de almacenamiento; Q es el término que representa las fuentes (entradas) y sumideros (salidas) de flujo del acuífero. El último término de la derecha de la ecuación representa la filtración a través de un lecho de confinamiento del flujo (laguna, río, dren, etc.), donde K_z y b representan la conductividad

hidráulica vertical y espesor del lecho de confinamiento respectivamente; h_{fuente} , es la carga hidráulica sobre el lecho de confinamiento.

Esta ecuación representa el balance instantáneo de volúmenes en un elemento infinitesimal del acuífero de coordenadas x , y , en un momento dado con las siguientes hipótesis:

1. Se considera que las propiedades físicas del acuífero son constantes en la dirección vertical.
2. Se considera que las velocidades son horizontales y constantes a lo largo de una vertical, se cumple la hipótesis de J. Dupuit (1863), con valor dado por la ley de H. Darcy. (1856):

$$V = -K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (3.2)$$

Siendo K la permeabilidad o conductividad hidráulica.

3.3 Métodos numéricos de solución

Las ecuaciones diferenciales parciales del flujo de agua subterránea en los acuíferos pueden resolverse utilizando dos métodos:

- 1) Soluciones analíticas:
 - Uso de supuestos simplificados para desarrollar una sola ecuación que represente las cargas hidráulicas.
 - Fácil de usar y requiere pocos datos hidrogeológicos.
 - Limita el alcance de la aplicación.
- 2) Soluciones numéricas:
 - Uso de métodos numéricos (diferencias finitas o elementos finitos) para resolver la ecuación diferencial parcial.
 - Difícil de realizar, más detalles y requieren más datos.
 - Aplicable en un rango más amplio de evaluaciones hidrogeológicas.

Las distintas metodologías de resolución numérica de la ecuación 3.1, para efectos de modelación del acuífero, se diferencian entre sí en las hipótesis de discretización del medio continuo. En general se supone que está dividido en una malla de elementos prismáticos de base rectangular o poligonal. La malla

rectangular puede ser de tamaño uniforme o variable, e igualmente, la malla poligonal puede ser uniforme o asimétrica.

A continuación se describe el método numérico de las diferencias finitas, existiendo otros en la actualidad, cada uno de ellos con ventajas y desventajas en su aplicación.

3.3.1 Método numérico de las diferencias finitas

El proceso de diferencias finitas es un proceso de cálculo aproximado que reemplaza las derivadas parciales por ecuaciones lineales.

Las aproximaciones son desarrolladas en función de la serie de Taylor. Así tenemos la derivada de una función en un punto cualquiera A y B (Fig. 3.2) es reemplazado por su valor aproximado (Ecuación 3.3).

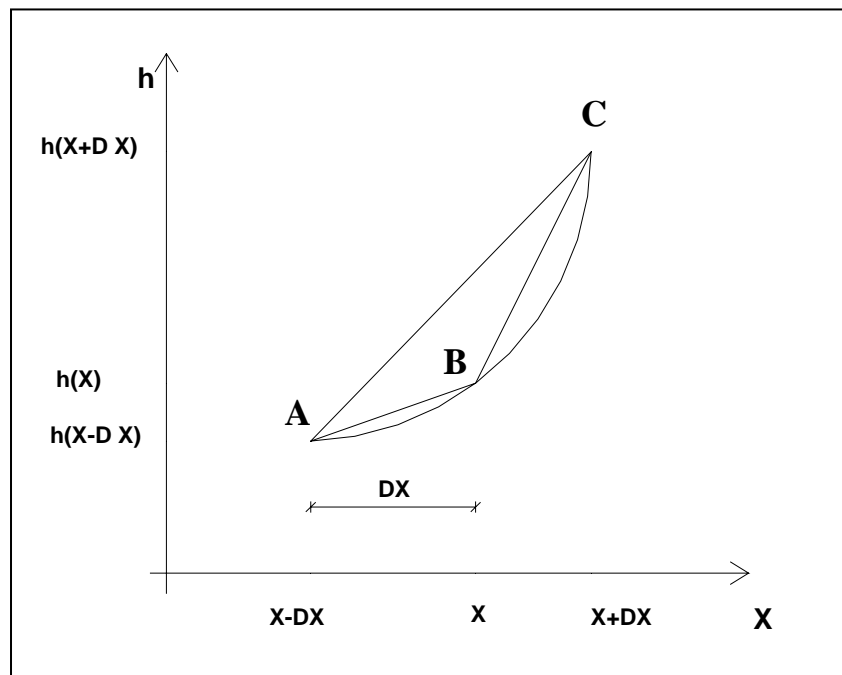


Figura 3.2 Representación geométrica de aproximación por diferencias finitas

Sea una función $h(x)$ en el punto B, se tiene:

$$h(x + \Delta x) = h(x) + \Delta x \frac{dh}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} d^2 \frac{h}{dx^2} + \dots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{d^n}{dx^n} \quad (3.3)$$

Tomando tangente en "B"

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h(x+\Delta x) - h(x)}{\Delta x} - \frac{\Delta x^2}{2!} \dots \dots \dots \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{d^n}{dx^n}$$

Denotando a:

$w(x)$ las aproximaciones de $h(x)$

$$\frac{dw}{dx} = \frac{dh}{dx} - 0$$

Entonces se tiene:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{w(x+\Delta x) - w(x)}{\Delta x} \tag{3.4}$$

Ecuación 3.4: aproximación de las diferentes finitas hacia adelante.

De la misma manera, se tiene:

$$h(x - \Delta x) = h(x) - \Delta x \frac{dh}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2 h}{dx^2} + \dots \dots \dots \frac{(-1)^n}{n!} \frac{d^n h}{dx^n} \tag{3.5}$$

Tomando tangente en "A"

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h(x) - h(x-\Delta x)}{\Delta x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{d^2 h}{dx^2} + \dots \dots \dots$$

$$\frac{d\omega}{dx} = \frac{w(x) - w(x-\Delta x)}{\Delta x} \tag{3.6}$$

Ecuación 3.6: aproximación de las diferencias finitas hacia atrás.

La aproximación de la segunda derivada, se obtiene sumando las ecuaciones 3.3 y 3.5.

$$h(x + \Delta x) + h(x - \Delta x) = 2h(x) + (\Delta x)^2 \frac{d^2 h}{dx^2} + 2 \frac{(\Delta x)^4}{4!} \frac{d^4 h}{dx^4} + \dots \dots \dots$$

Tenemos:

$$\frac{d^2h}{dx^2} = \frac{h(x - \Delta x) - 2h(x) + h(x + \Delta x)}{\Delta x^2} - \frac{(\Delta x)^2}{12} \frac{d^4h}{dx^4} + \dots$$

Tomando d^2w como la aproximación de d^2h ;

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{w(x + \Delta x) - 2w(x) + w(x - \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (3.7)$$

La ecuación 3.7 es expresada como una ecuación lineal en un flujo unidimensional.

3.3.2 Aplicación de las diferencias finitas al estado permanente del flujo bidimensional

El acuífero es dividido por un mallado de "celdas rectangulares". Las intersecciones de las líneas de las mallas son llamados nodos, que son referenciados con una columna (i) y una fila (j) colineales con las direcciones "x" e "y", respectivamente (Fig. 3.3)

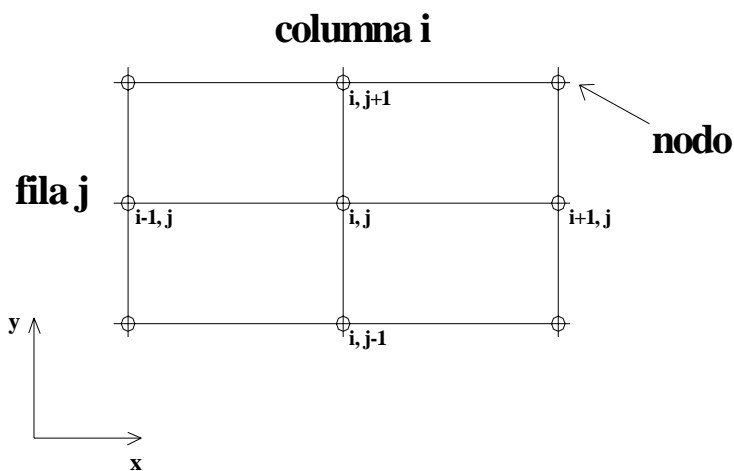


Figura 3.3 Mallado de celdas rectangulares en un modelo de diferencias finitas

En cada nodo (i, j) del mallado se aplica la ecuación de continuidad y la ley de Darcy. Las ecuaciones continuas son sustituidas por un conjunto de

ecuaciones lineales cuya solución permite obtener los valores de la carga en número finito de puntos. La ecuación que gobierna el estado permanente del flujo bidimensional para un acuífero heterogéneo, saturado, anisotrópico, y porosidad media es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm Q(x, y) = 0 \quad (3.8)$$

Donde:

- T_{xx}, T_{yy} = Componente principal del tensor de transmisividad.
- x, y = Coordenadas cartesianas.
- $Q(x, y)$ = Flujos volumétricos de sumideros (-) y fuentes (+) por unidad de área de superficie de acuífero. Este término puede representar pozos de bombeo/inyección, evapotranspiración, infiltración y pérdida de superficies de cuerpos de agua.

Las ecuaciones de continuidad y de derivadas parciales mostrado en la ecuación 3.8 son sustituidas por la siguiente ecuación simplificada de la serie de Taylor en diferencias finitas.

$$\frac{1}{\Delta x_{i,j}} \left[\frac{T_{xxi+\frac{1}{2},j} (h_{i+1,j} - h_{i,j})}{\Delta x_{i+\frac{1}{2},j}} \right] - \left[\frac{T_{xxi-\frac{1}{2},j} (h_{i,j} - h_{i-1,j})}{\Delta x_{i-\frac{1}{2},j}} \right] +$$

$$\frac{1}{\Delta y_{i,j}} \left[\frac{T_{yyi,j+\frac{1}{2}} (h_{i,j} - h_{i,j})}{\Delta y_{i,j+\frac{1}{2}}} \right] - \left[\frac{T_{yyi,j-\frac{1}{2}} (h_{i,j} - h_{i,j-1})}{\Delta y_{i,j-\frac{1}{2}}} \right] = -Q_{i,j} \quad (3.9)$$

Para desarrollar una ecuación de la forma de la ecuación anterior en cada nodo del mallado, se necesita un gran conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas (N_x, N_y), la cual deberá resolver en cada instante las cargas piezométricas desconocidas en cada nodo.

El sistema de ecuaciones considerado en 3.9, es considerado lineal, siempre que los coeficientes de la variable h , sean independientes de los niveles o carga hidráulica. Sin embargo, esto no ocurre siempre, ya que los coeficientes son función de las transmisividades, y a su vez, éstas son función de los niveles en el caso de los acuíferos libres. A pesar de ello, existen actualmente procesos numéricos que utilizan la resolución de sistemas de ecuaciones lineales del tipo 3.9, que se aproximan suficientemente a la realidad.

En efecto, en un acuífero libre, las variaciones de los niveles de agua no suelen ser importantes entre uno y otro intervalo de integración. Esta consideración se hace aun más válida cuando el espesor saturado del acuífero es de considerable magnitud, aceptándose la ecuación 3.9 del tipo lineal. En este caso se dice que se utiliza un esquema implícito lineal de resolución, ya que para cada intervalo basta resolver un sistema de ecuaciones lineales.

Sin embargo, en el caso de acuífero libre con descensos fuertes o con el espesor saturado pequeño, la hipótesis de suponer las transmisividades en $t+\Delta t$ semejantes a las de t , puede resultar inexacta. La resolución de estos esquemas se llama implícitos no lineales.

Tanto en uno como en otro esquema, se precisa contar con un método de solución numérica de un sistema de ecuaciones lineales. Existe una gran variedad de métodos para la resolución de los sistemas de ecuaciones lineales, los cuales tienen dos orientaciones:

- a) Métodos directos.
- b) Métodos indirectos.

Los primeros parten de la matriz de coeficientes, lo cual aplicando reglas del álgebra lineal se obtienen los valores de la solución directamente en función de los coeficientes de las ecuaciones.

Los segundos parten de una solución inicial aproximada, que mediante transformaciones se hacen converger hacia la solución verdadera, siendo

uno de ellos el método IADI (Iterative Alternating Direction Implicit Procedure), desarrollado por Peaceman – Rachford (1955). Esta técnica de iteración es requerida para resolver problemas no lineales y es incondicionalmente estable (Kinzelbach, 1986) Asimismo, se puede establecer con facilidad los criterios de convergencia partiendo de un nivel estimado.

3.3.3 Acuífero no confinado o libre

Para acuíferos libres el espesor saturado $b_{i,j}$ es una función de las cargas hidráulicas (Fig. 3.4), en el modelo tanto las cargas hidráulicas como el espesor saturado son desconocidas. Una suposición inicial es requerir del espesor saturado para estimar las transmisividades $T_{xx_{i,j}}$ y $T_{yy_{i,j}}$. Un proceso iterativo debe ser usado para calcular la distribución de carga hidráulica, actualice las transmisividades y verifique si la discrepancia entre el espesor saturado previamente estimado y actualizada no sea mayor que una tolerancia especificada.

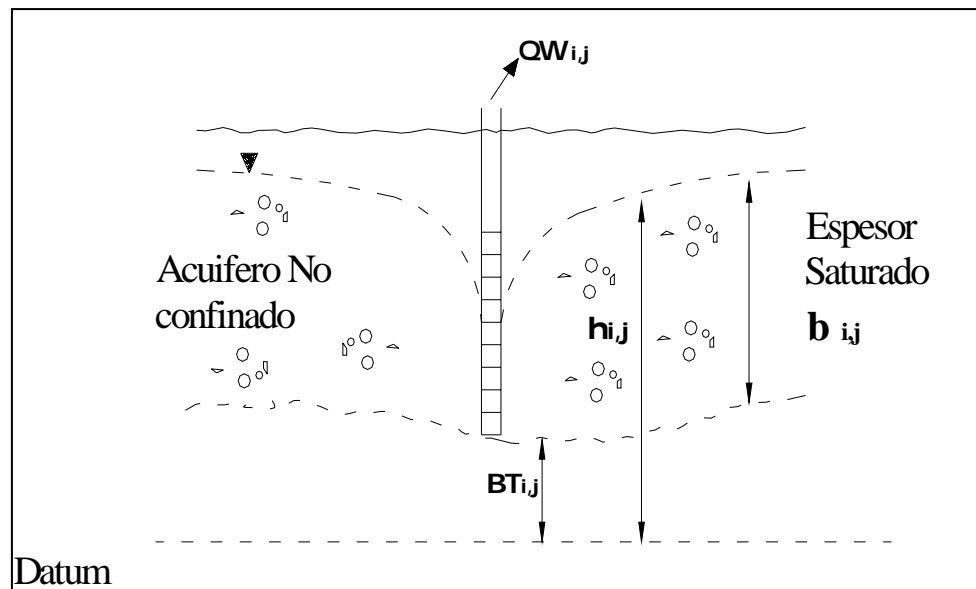


Figura 3.4 Representación esquemática de un acuífero no confinado o libre

Las transmisividades de los nudos adyacentes $T_{xx_{i+1/2, j}}$, $T_{yy_{i, j+1/2}}$ es calculado multiplicando los promedios armónicos de los conductividades hidráulicas por promedios geométricos de espesor saturado (Bibby, R. 1971).

$$T_{xx_{i+\frac{1}{2}, j}} = K_{xx_{i+\frac{1}{2}, j}} \sqrt{(h_{i+1, j} - BT_{i+1, j})(h_{i, j} - BT_{i, j})} \quad (3.10)$$

$$T_{yy_{i, j+\frac{1}{2}}} = K_{yy_{i, j+\frac{1}{2}}} \sqrt{(h_{i, j+1} - BT_{i, j+1})(h_{i, j} - BT_{i, j})}$$

Donde:

$BT_{i, j}$ = Profundidad del basamento en el nudo i, j .

$K_{xx_{i+1/2, j}}$, $K_{yy_{i, j+1/2}}$ = Conductividad hidráulica entre las celdas i, j , e $i+1, j$; y las celdas i, j e $i, j+1$, respectivamente (fig. 3.3).

$$K_{xx_{i+1/2, j}} = \frac{(\Delta x_{i, j} + \Delta x_{i+1, j}) K_{xx_{i+1, j}} K_{xx_{i, j}}}{K_{xx_{i+1, j}} \Delta x_{i+1, j} + K_{xx_{i, j}} \Delta x_{i, j}} \quad (3.11)$$

$$K_{yy_{i, j+1/2}} = \frac{(\Delta y_{i, j} + \Delta y_{i, j+1}) K_{yy_{i, j+1}} K_{yy_{i, j}}}{K_{yy_{i, j+1}} \Delta y_{i, j+1} + K_{yy_{i, j}} \Delta y_{i, j}} \quad (3.12)$$

3.4 Intrusión marina

La intrusión de agua salada o marina se debe al movimiento permanente o temporal del agua salada hacia el continente; desplazándose la cuña marina al interior del agua dulce. Así, el agua captada en un acuífero costero se contamina (saliniza) cuando la porción activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de agua dulce y agua salada.

Según la FAO (1981) los problemas de aguas saladas en acuíferos continentales son debidos en primer lugar, al agua de mar que quedó atrapada en los sedimentos durante su deposición o durante los movimientos tectónicos. Por otra parte los domos salinos u otras sales contenidas en las formaciones pueden producir aguas de elevada concentración total. Otro de los orígenes de la contaminación de agua salada en un acuífero costero es la

sobreexplotación de las aguas por bombeo, descendiendo el nivel de agua freático y provocando el avance anormal de la cuña marina.

La cuña marina es una masa de agua salada de gran longitud a lo largo de la costa, con sección en forma de cuña apoyada en la base del acuífero y vértice o pie hacia tierra adentro en donde se encuentra la zona de mezcla (Fig. 3.5)

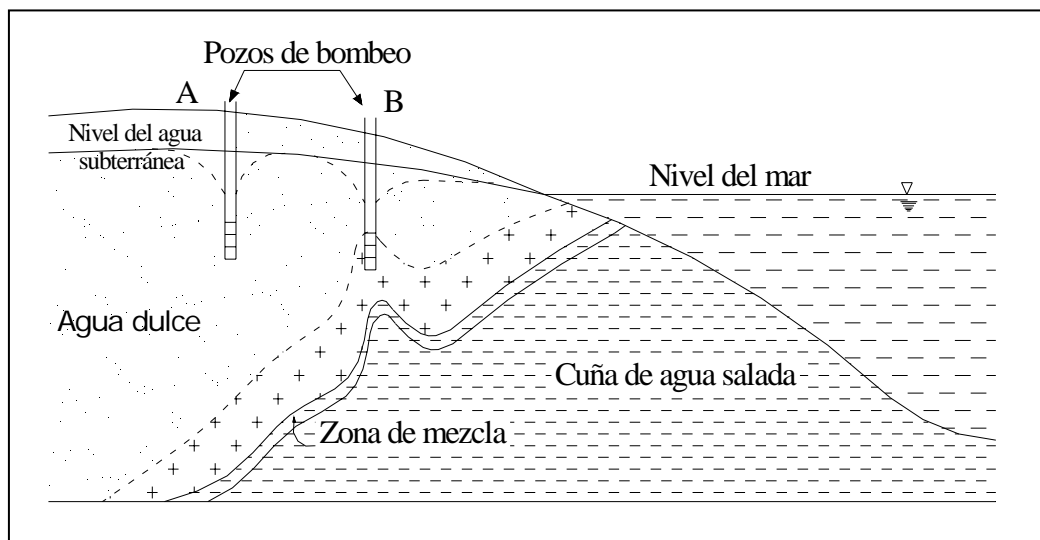


Figura 3.5 Desplazamiento de la cuña marina hacia el continente, donde se aprecia la zona de mezcla agua dulce y agua salada

Bear, Verruijt (1987) mencionan que el agua salada y el agua dulce son realmente dos líquidos miscibles, por lo tanto en la zona de contacto entre ellos toman la forma de una zona de transición causada por la dispersión hidrodinámica. Esta zona de mezcla, llamada también zona de difusión, refleja con intensidad variable las propiedades químicas e hidráulicas de cada uno de los líquidos originales, y su ancho depende de la difusividad y dispersividad del medio y de las características del movimiento.

La zona de mezcla dentro de la cual se sitúa la interfase teórica, es una zona dinámica en la cual el agua se mueve no sólo como consecuencia de la diferencia de densidad, sino también a consecuencia de cambios de nivel piezométrico en ambos líquidos.

El peso específico del agua dulce se puede considerar como $\rho_d = 1000 \text{ kg/m}^3$, siendo el del agua marina mayor, entre 1020 y 1030 kg/m^3 , según la salinidad y la temperatura, considerándose el valor más usual de $\rho_s = 1025 \text{ kg/m}^3$.

3.4.1 Posición de la cuña de agua salada en ausencia de mezcla

a. Formula de Ghyben-Herzberg

Los primeros estudios de la relación del agua dulce y del agua salada en regiones costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon Ghyben (1889) y Herzberg (1901) Se basa en el equilibrio estático de columnas de agua de diferente densidad (Fig. 3.6). Las hipótesis básicas admitidas son:

- 1) El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- 2) No existe flujo de agua salada.
- 3) La interfase es un plano, no existiendo zona de mezcla.

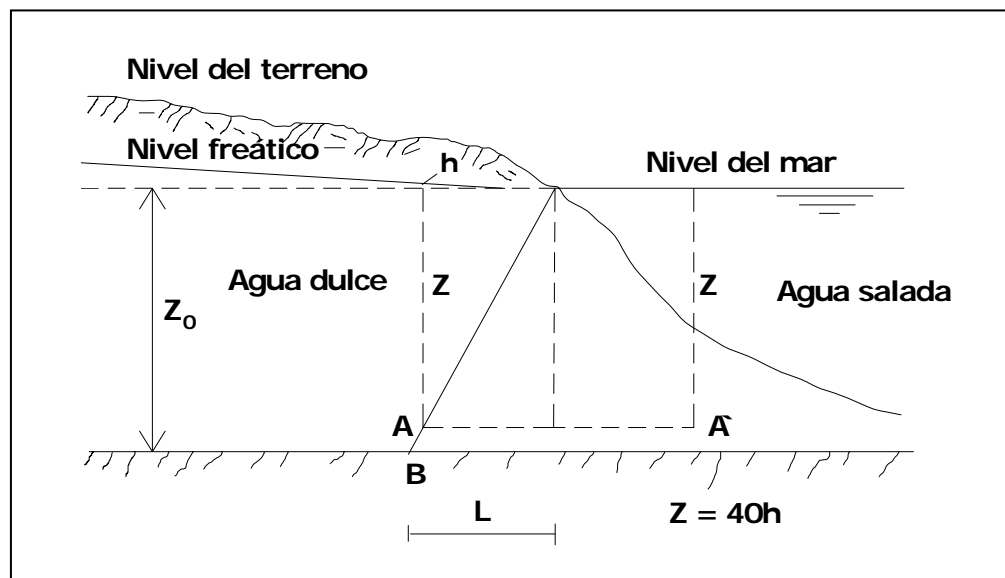


Figura 3.6 Equilibrio de agua dulce y agua marina según Ghyben-Herzberg

En estas condiciones, en un punto cualquiera A de la interfase debe equilibrarse la presión del agua dulce y del agua salada.

$$(h + Z) \gamma_d = Z \cdot \gamma_s$$

Despejando la profundidad Z:

$$Z = h \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d}$$

$1/\beta$ varía de acuerdo a la densidad del agua del mar entre 50 y 33 siendo el valor más frecuente 40. Ello quiere decir que la interfase se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a 40 veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto. (Carga piezométrica)

$$Z = 40 h$$

Se puede concluir que la máxima penetración de la cuña de agua salada, según la hipótesis de Ghyben-Herzberg, está limitada por el fondo impermeable del acuífero (punto B de la figura 3.6) y se presenta cuando:

$$H = Z_o \beta$$

b. Corrección de la relación Ghyben-Herzberg

La Ley de Ghyben-Herzberg no describe con exactitud la posición de la interfase marina en el acuífero y más aun, cerca al afloramiento del agua dulce en el mar. En la figura N° 3.7 se observa un frente de descarga para el flujo del agua dulce a velocidades crecientes, esto debido a la existencia de un gradiente piezométrico. Las líneas equipotenciales son constantes y las líneas de flujo tienen una pendiente hacia arriba, la distancia a la intercara dada por la relación Ghyben-Herzberg (punto B) es menor que la profundidad real (punto A). Para gradientes pequeños la diferencia se mantiene pequeña.

Es importante mencionar que para que exista equilibrio (condición Ghyben-Herzberg) entre el agua dulce y agua salada, se requiere que el nivel freático o superficie piezométrica este por encima del nivel del mar y la pendiente este dirigida hacia el Océano.

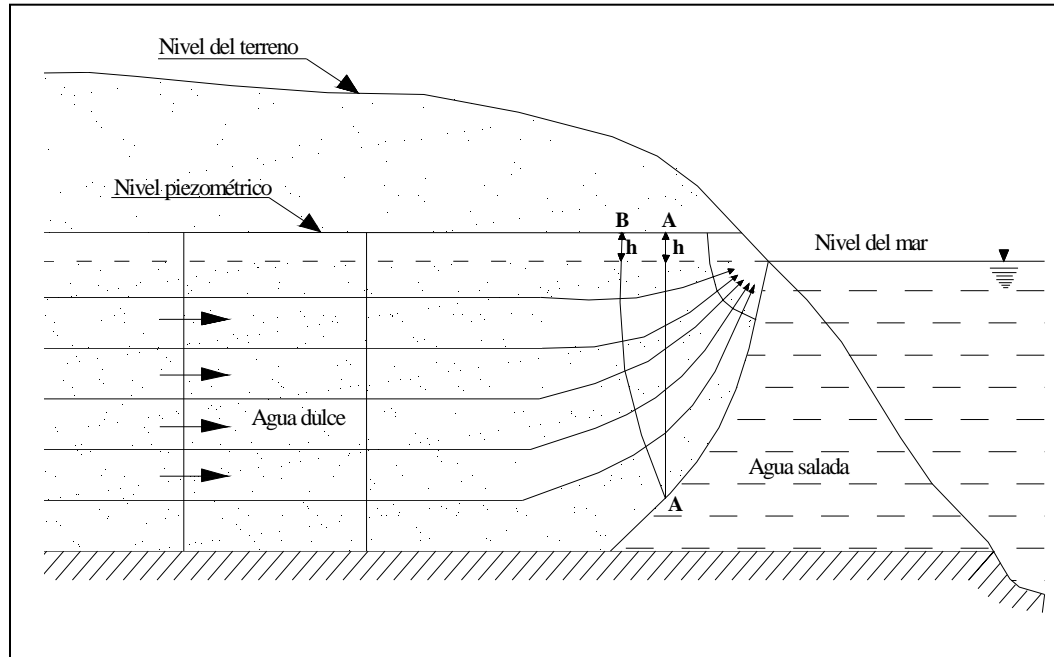


Figura 3.7 Influencia de la descarga de agua dulce a velocidades crecientes (Tomado de Custodio y Llamas)

3.4.2 Inclínación de la interfase

La condición para que la interfase sea estacionaria exige que la velocidad del agua dulce V_d y del agua salada V_s , sean paralelas para una misma sección vertical (Fig. 3.8)

De la ley de Darcy:

$$V_d = -K_d \frac{dh_d}{ds}, \quad V_s = -K_s \frac{dh_d}{ds} \quad (3.14)$$

Igualando las presiones en un punto de la interfase.

$$(Z + h_d) \gamma_d = (Z + h_s) \gamma_s \quad (3.15)$$

Despejando h_d y derivando la ecuación 3.15 respecto a la línea de la interfase (ds), se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{V_d}{K_d} - \frac{V_s}{K_s} - \frac{\gamma_s}{\gamma_d} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot \frac{dz}{ds} \quad (3.16)$$

Cuando el agua dulce y el agua salada están en reposo, en la interfase se cumple que $V_d = V_s = 0$, y la ecuación de la interfase es $dz/ds = 0$ (interfase horizontal)

Si el agua dulce está en movimiento y el agua salada en reposo ($V_s = 0$.)

$$\frac{dz}{ds} = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot \frac{V_d}{K_d} \quad (3.17)$$

$$\frac{dz}{ds} = \frac{1}{\beta} \frac{dh_d}{ds}$$

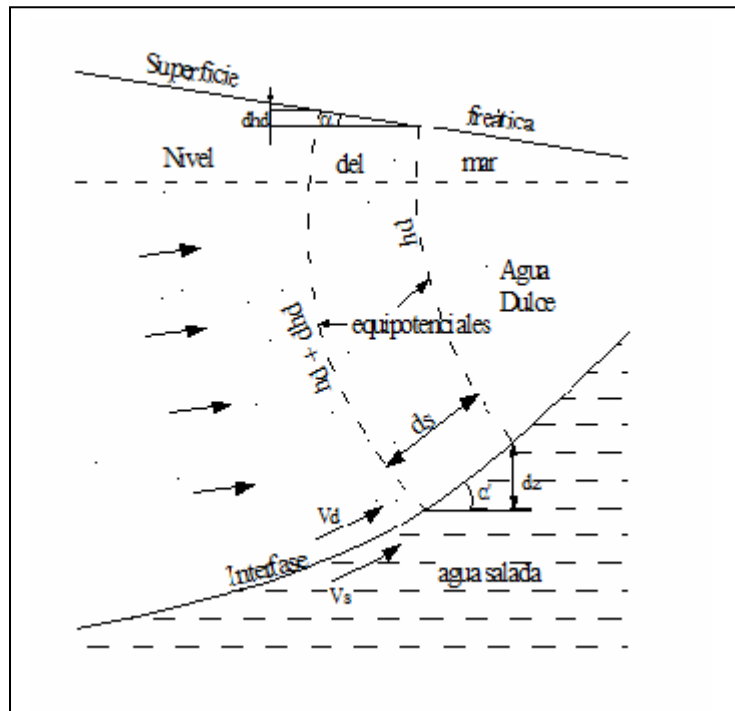


Figura 3.8 Inclinación de la interfase agua dulce y agua salada (tomado de Custodio y Llamas)

De la figura N° 3.8, se obtiene lo siguiente:

$$\text{Seno } A = \frac{dh_d}{ds} = \frac{V_d}{K_d} \quad (3.18)$$

$$\text{Seno } A' = \frac{dz}{ds} \quad (3.19)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.18 y 3.19 en la ecuación 3.17 se obtiene:

$$\frac{\text{seno } A}{\text{seno } A'} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \quad (3.20)$$

A y A' son las pendientes del nivel freático o piezométrico y de la interfase respectivamente, en puntos que corresponden sobre un mismo equipotencial del agua dulce. Bear J. (1987), llegó a demostrar que en el lugar de contacto entre la interfase y el fondo del mar, la inclinación de la interfase llega a ser vertical.

3.4.3 Interfase dinámica

En la zona de mezcla existe una difusión entre los dos líquidos a ello se suma la dispersión hidrodinámica originada por el movimiento del agua normalmente y a lo largo de la interfase, esta zona de mezcla está en movimiento con velocidad paralela al plano central; asimismo, este movimiento limita el espesor de la zona de mezcla, que es tanto menos gruesa, cuanto mayor es el flujo.

El movimiento del agua de la mezcla es inducido por el movimiento del agua dulce. El mismo movimiento provoca un flujo de agua salada hacia el interior del continente, para ello se precisa de un gradiente y por eso el nivel piezométrico del agua salada en el terreno es ligeramente inferior al agua libre del mar.

Si hay intrusión marina, existe un mayor movimiento de agua salada hacia el interior del continente y por lo tanto el valor de h_s , es aún más negativo; la interfase es más profunda y más inclinada lo que ocasiona, además que el

espesor de la zona de mezcla sea menor. Si por el contrario es el agua dulce la que está desplazando al agua marina, el movimiento del agua salada hacia el mar precisa que h_s sea positivo y por lo tanto su pendiente es mucho menor y el espesor de la interfase es mayor lo que hace menor el lavado de sales. De acuerdo a Tyagi y Todd (1975) mencionado por la FAO (1981) dan la siguiente clasificación para los regímenes de la interfase:

- a. **Régimen de recarga:** en la zona costera el agua dulce se mueve en el acuífero por encima del nivel del mar y sale ligeramente mar adentro o en la misma línea de la costa. La interferencia es parabólica.
- b. **Régimen de circulación reducida:** debido a los bombeos o a deficiencias en la recarga natural, el nivel del acuífero baja, aunque no por debajo del nivel del mar. La zona de salida del agua dulce hacia el mar se reduce y la zona de transición se mueve tierra adentro hasta que alcanza el equilibrio.
- c. **Régimen de circulación nula:** un aumento en los bombeos produce un descenso en la superficie piezométrica de tal manera que no se produce pérdida o salida del agua dulce al mar. La zona de transición se hace más amplia, moviéndose tierra adentro a velocidad creciente.
- d. **Régimen de circulación invertida:** el movimiento de la interfase tierra adentro se acelera debido a un aumento en los bombeos y modificación de la superficie piezométrica, que está por debajo del nivel del mar.
- e. **Régimen de sobre-explotación:** las condiciones de flujo invertido se hacen más severas y la interfase se mueve tierra adentro, hacia los pozos causantes de la sobre-explotación.

3.4.4 Fórmula de Hubbert

Bajo la condición de una zona de mezcla pero considerando una transición de la zona salada al agua dulce muy rápida, se llega a determinar la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot h_d - \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot h_s \quad (3.21)$$

Reemplazando β se obtiene la formula de Hubbert

$$Z = \left(\frac{1}{\beta} \right) \cdot h_d - \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \cdot h_s \quad (3.22)$$

Donde h_d es nivel del agua dulce sobre el nivel del mar (valor positivo) y h_s es el nivel de agua salada bajo el nivel del mar (generalmente negativo). La profundidad Z de la interfase vendrá dada por el equilibrio entre ambas columnas del líquido.

Si se conoce el potencial de agua dulce y del agua salada en una misma vertical en puntos algo separados, puede admitirse que esos potenciales serán similares a los existentes en la interfase y puede calcularse el valor de z , aproximadamente, en el supuesto de que la zona de mezcla sea poco espesa.

3.5 Construcción y utilización de un modelo

A continuación se describen las etapas principales que se contemplan en la construcción de un modelo matemático de un acuífero (Custodio y Llamas, 1996). En principio, las fases en que se puede considerar dividida la ejecución de un modelo matemático son los siguientes:

- 1) Toma de datos
- 2) Preparación y ajuste
- 3) Calibración y simulación del modelo matemático para la toma de decisiones sobre la explotación y estudio del acuífero.

3.5.1 Toma de datos físicos

Los datos físicos tienen dos fuentes: topográfica e hidrogeología. El aspecto topográfico define la planimetría y altimetría del acuífero.

El aspecto hidrogeológico determina los trabajos necesarios para definir la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento en el área a modelar.

En el aspecto de acciones exteriores se precisa definir las componentes de dichas acciones, como la lluvia, bombeo, infiltración posible de los ríos, riesgo de intrusión marina. En cuanto al comportamiento del acuífero se precisa definir la serie histórica de niveles en una serie significativa de puntos del acuífero que represente adecuadamente la evolución de la superficie piezométrica.

3.5.2 Preparación y ajuste del modelo

Una vez definidos los datos geométricos, hidrogeológicos e históricos de la fase anterior, hay que realizar la discretización espacial del acuífero, es decir, la sustitución del medio continuo por una serie de elementos rectangulares o poligonales.

a) Discretización espacial del acuífero

La primera fase del tratamiento matemático de un acuífero, consiste en la sustitución del medio continuo situado dentro del contorno por una serie de elementos rectangulares o poligonales. Discretizar la zona de estudio consiste en dividir el área en regiones y una serie de segmentos en los cuales se destaca sus nodos, que generan el tipo de mallado. Según la malla poligonal sea regular o irregular, el aspecto es como el indicado en la Fig. 3.9

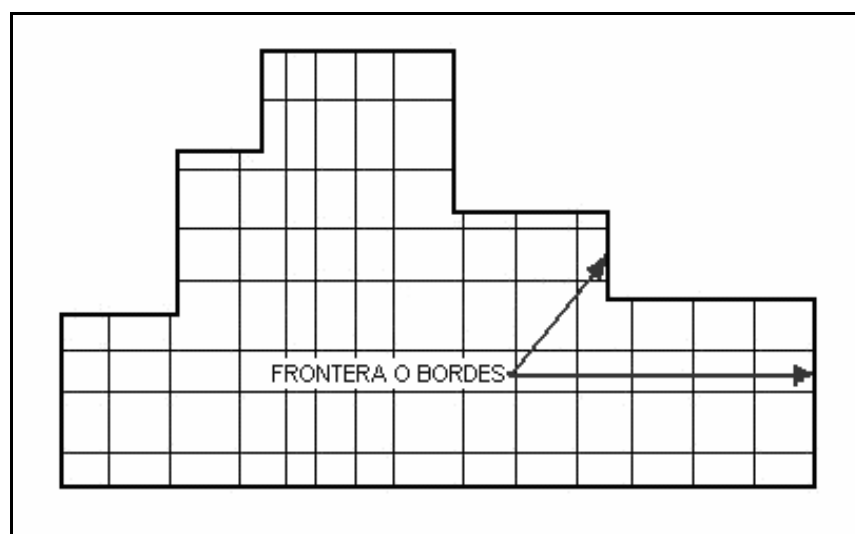


Figura 3.9 Discretización del acuífero en una malla rectangular

Las ventajas e inconvenientes de cada tipo de malla se pueden definir atendiendo a varios criterios:

- 1) Ajuste al contorno: La rectangular y poligonal variable, son las más convenientes. Para la misma calidad del ajuste esta última requiere menos elementos que la rectangular.
- 2) Ajuste a las condiciones de la superficie piezométrica: La rectangular y la poligonal variable permiten el uso de elementos más pequeños en zonas con fuertes bombeos. De este modo, se reducen los errores que se producirían al mantener la misma malla con gradientes fuertes. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que estas condiciones pueden variar a lo largo del tiempo, con lo cual, hay que dibujar una nueva malla.
- 3) Automatización de entrada y salida de datos: La malla rectangular variable es la más conveniente desde este punto de vista. La poligonal variable se recomienda en condiciones de gran irregularidad en el contorno del acuífero.
- 4) Eficiencia de los métodos de cálculo: Las mallas poligonales exigen menos elementos para la misma calidad de resultados, pero no permiten la aplicación de métodos muy eficientes para la solución de sistemas de ecuaciones.

El dibujo de la malla se realiza por tanteos, hasta llegar a una solución que tenga un ajuste adecuado, tanto al contorno como a la superficie piezométrica. El mallado rectangular variable, es superpuesto sobre el mapa del sistema acuífero para discretizar el sistema. Las celdas o bloques están definidos por líneas verticales y horizontales, y la intersección de estas líneas forma los nodos. Una vez definida la malla se asignan los valores característicos a partir de los datos originales. Estos valores son su ubicación, área, elementos adyacentes, transmisividad o permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, conductividad de la capa confinante, cotas del basamento y techo del acuífero, etc.

b) Condiciones de borde o límites espaciales

Una vez sustituido el acuífero continuo por la malla discreta elegida, hay que definir el tipo de condición de borde impuesto a cada segmento de la línea

quebrada que sustituye al contorno real del acuífero. En el flujo de agua subterránea se establecen hasta tres condiciones de borde.

1) Borde de nivel constante o Potencial impuesto (condición tipo Dirichlet)

Se utiliza cuando se producen contactos entre el acuífero y masas de agua superficiales o en lugares donde ocurre recarga o descarga subterránea del acuífero (nivel del mar, lagos, ríos, etc.)

La inclusión de un límite de este tipo es sencilla. Basta con fijar el nivel de los nodos correspondientes para los cuales no hay necesidad de resolver la ecuación del flujo subterráneo (condición de Dirichlet).

$$h = f(x, y, z, t)$$

Si no se quiere realizar de este modo, debido a la necesidad de incluir un índice que especifique si se trata de un nudo de nivel constante, puede emplearse un coeficiente de almacenamiento muy grande, (Prickett, 1971). De este modo, el nivel no varía, ya que todo el balance, positivo o negativo, es absorbido por el almacenamiento con un cambio de nivel despreciable.

2) Bordes impermeables o caudal impuesto (condición tipo Neumann)

Corresponde a las zonas donde el acuífero se encuentra en contacto con formaciones geológicas impermeables; es decir, donde no existan entradas o salidas de agua. También se utilizan cuando el límite del modelo coincide con una línea de corriente, equivalente a un límite impermeable, ya que no circula agua a través de ella.

La expresión matemática del caudal en la dirección x , a través de un elemento de ancho Δx es, según la ley de Darcy:

$$Q_x = -T_x \frac{\partial h}{\partial x} \Delta y \quad (3.23)$$

Para que Q_x sea nulo, sólo es necesario que la transmisividad T_x o bien el gradiente $\Delta h / \Delta x$ sea nulo. Este segundo planteamiento se trata del llamado matemáticamente "condición de Newman" en el que se especifica

el valor de la derivada de la variable. Cualquiera de los dos planteamientos es factible numéricamente y el empleo de uno u otro dependerá del programa o software de simulación empleado.

3) Bordes de gradiente constante (condición tipo mixta o de Cauchy)

Este tipo de bordes se presente en casos en que por razones de tamaño no es posible modelar el acuífero completo. Entonces se dan casos en que considerar gradiente constante puede ser más correcto que considerar nivel constante. Es el caso de acuíferos aluviales muy largos en que se modelan secciones independientes.

Numéricamente, equivale a asignar el gradiente deseado a los nudos del borde. Se utiliza cuando los contornos son permeables y se conocen los valores de los gastos de entrada o salida, a través de los contornos (Infiltraciones laterales, flujo superficial o subterráneo a la entrada de un valle); en forma matemática se expresa mediante la ecuación 3.24.

$$-K_{xx} \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{K'}{b} (h_o - h) \quad (3.24)$$

Donde K'/b es denominado coeficiente de filtración o drenaje; h_o , es muchas veces considerado constante, pero también puede ser función de variables espaciales y de tiempo. Se trata nuevamente del problema de Newman, en que se fija el valor de la derivada (gradiente). La condición de borde impermeable es un caso particular de gradiente constante, puesto que éste es nulo.

La Fig. 3.10 muestra un problema típico de campo, en planta y sección transversal, identificándose casos de las tres condiciones de contorno (Cleary, 1991), como se explica a continuación:

- A lo largo de BC, CD y AD están las de segundo tipo, condiciones de no flujo para ambos acuíferos.
- GH, es una condición de no flujo para acuífero confinado.
- AB, es una condición de carga constante, del primer tipo para acuífero libre.

- EF, es un ejemplo de condición de borde de tercer tipo, describiendo el drenaje de un acuífero freático superior para un acuífero confinado inferior.

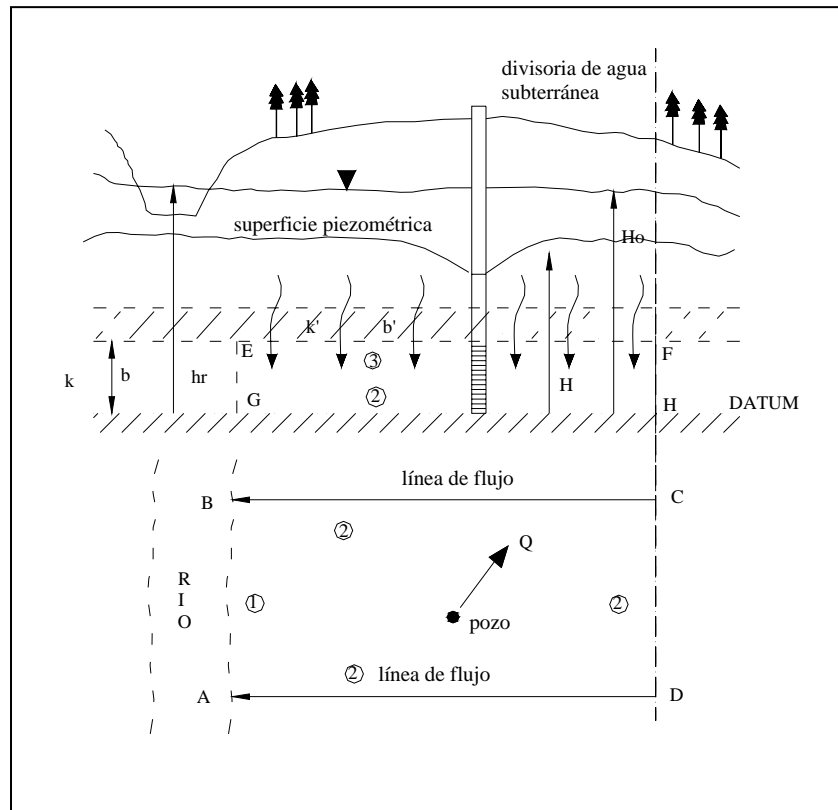


Figura 3.10 Tipos de condiciones de borde (según Cleary, 1991)

c) Condiciones de borde temporales

- 1) Estado inicial del acuífero: para resolver la ecuación de flujo en cada elemento, intervalo por intervalo, es necesario conocer la situación inicial de los niveles piezométricos en el acuífero. Según Bibby (1971), la influencia de los errores en el estado inicial sobre los resultados del modelo es mayor que la de los errores de los demás datos
- 2) Niveles definidos en el tiempo: este tipo de condición de borde corresponde al caso en que el borde o nivel constante (embalse, lago, río, etc.) puede variar su nivel de intervalo a intervalo según una ley fija e independiente del estado del acuífero.

d) Caudales prefijados

Aunque no se trata de una condición de borde estrictamente hablando, las extracciones por bombeo son fijadas como gastos puntuales en cada nodo. Para suministrar esta información al modelo, es necesario ubicar los pozos existentes en la zona en el plano de la discretización, de forma tal que pueda asignarse cada pozo a un nodo. Una vez fijados los pozos se anotan las extracciones de cada pozo durante el período de la calibración y luego se suman para obtener la explotación total del acuífero.

La otra componente de la función (+/-Q) de la ecuación 3.8, lo constituye la recarga al acuífero debido a la infiltración; y por tanto, al igual que los bombeos, es conocido o al menos estimada, si se simula un período histórico; y supuesto si es un período futuro.

3.5.3 Calibración y simulación del modelo

a) Calibración

En esta fase del modelamiento se realiza el ajuste, verificación, calibración o validación del modelo. En este proceso se busca obtener un buen ajuste entre los niveles calculados y los observados durante un período de registro conocido. Asimismo, el proceso puede incluir la modificación de los datos de partida (transmisividad o conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, recargas) hasta conseguir que las diferencias entre los niveles observados y calculados sean adecuadas para la precisión requerida por el problema tratado, hasta reproducir el mapa de hidroisohipsas histórico.

Es fundamental tener en cuenta que los resultados del modelo no pueden ser mejores que los datos de partida. Esto implica que si los datos son malos, aunque el ajuste sea bueno, los resultados no serán de garantía, ya que hay infinidad de combinaciones de los datos geométricos, hidrogeológicos e históricos que producen los mismos niveles piezométricos.

La determinación de las propiedades hidrogeológicas se obtiene luego de calibrar el modelo y estos caracterizaran el comportamiento del acuífero.

b) Simulación

Finalmente, existe una tercera etapa que es la simulación del modelo una vez construido y calibrado, en la cual se define una serie de procesamientos de cálculo con el computador, tales que en ellos las acciones exteriores que se consideren sean lo suficientemente representativas de las condiciones que de una manera general se trata de estudiar. Con la simulación para diferentes hipótesis se obtiene una serie de resultados que permiten elaborar un plan de decisiones adecuadas con relación a la explotación, conservación y recarga del acuífero.

Un modelo de simulación comúnmente toma la forma de un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema acuífero, expresado como relaciones matemáticas o lógicas entre los objetos de interés del sistema. En contraste con las soluciones matemáticas exactas disponibles en la mayoría de los modelos analíticos, el proceso de simulación incluye la ejecución del modelo a través del tiempo para generar muestras representativas de las mediciones del desempeño o funcionamiento. En este aspecto, se puede considerar a la simulación como un experimento de muestreo acerca del sistema real, cuyos resultados son puntos de muestra.

Es evidente que cuanto más puntos de muestra generemos, mejor será nuestra estimación. Sin embargo, hay otros factores que tienen influencia sobre la bondad de nuestra estimación final, como las condiciones iniciales de la simulación, la longitud del intervalo que se simula y la exactitud del modelo mismo.

CAPÍTULO IV

DATOS RECOLECTADOS

CAPITULO IV

DATOS RECOLECTADOS

4.1 El sistema acuífero La Yarada

Ante la ausencia de corrientes superficiales permanentes en la Región Tacna, el acuífero La Yarada es la principal fuente de agua, el cual es utilizado para el abastecimiento poblacional, la industria y sobre todo para el riego de las zonas de La Yarada, sector de los Asentamientos, Magollo, Los Palos y Santa Rosa. El acuífero constituye un sistema complejo (Estudio hidrogeológico de las Pampas de La Yarada y Hospicio, 1,996) con grandes variaciones laterales y verticales que hasta la actualidad aun no están plenamente conocidos.

Se infiere que la explotación intensiva y descontrolada del acuífero, así como la carencia de programas de reforestación en el área de recarga, el acuífero ha presentado descensos en sus niveles piezométricos especialmente en la zonas cercanas al litoral, que se verifica en algunos pozos de explotación, al obtener agua con cierto grado de salinidad.

4.1.1 Características geométricas y litológicas del acuífero forma y límites

Las pampas de La Yarada, donde está ubicado el acuífero del mismo nombre presenta la forma de un delta, con el vértice hacia la ciudad de Tacna, cuya base comprende parte del litoral tacneño con 27.2 km (ver Fig. 5.1) y que comprende las pampas de La Yarada y Hospicio. El acuífero está relacionado principalmente con la cuenca del río Caplina y posiblemente con la del Sama.

Con la finalidad de conocer aún más la geomorfología de la zona, en el 2003, el INRENA realizó estudios geofísicos que permitieron identificar geoformas, en relación al acuífero y su entorno. De la revisión efectuada al estudio hidrogeológico, se tiene lo siguiente:

1. Aspectos estratigráficos

En el área de estudio, afloran formaciones volcánicas, sedimentarias e intrusivas que a continuación se mencionan, de las más antiguas a las más jóvenes.

- Formación Chocolate - Jurásico Inferior: se ubica en los cerros de La Yarada, y lados adyacentes, consiste de derrames volcánicos de composición andesítica de carácter impermeable.
- Formación Guaneros-Jurásico Superior: aflora en el cerro de Los Pabellones, Morro de Arica, parte Norte y Sur del acuífero; compuesta en su base por una serie de areniscas y lutitas calcáreas impermeables; equivalente en edad y litología a la formación Ataspaca de la zona de Calientes, Vilavilani. Se le considera como el basamento rocoso del acuífero.
- Formación Moquegua-Terciario Superior: aflora en los cerros Huahuapas y Chuschuco (Pachía); consiste en una intercalación de areniscas tufáceas conglomeradas, arcillas y limos medianamente compactados con espesores de 500 a 1,000 m. Posee buenas características de permeabilidad, constituyendo en profundidad un acuífero potencialmente explotable (formación Moquegua Inferior).
- Formación Huaylillas - Terciario Superior: de amplia distribución en los flancos del acuífero; se le ubica en los cerros Intiorko, Arunta, Magollo, Calana, Chastudal, Hospicio Antiguo; consiste de tufos riolíticos de texturas variables. Es de carácter impermeable.
- Cuaternario (Depósitos Aluviales–Eólicos Marinos y Cenizas Volcánicas): los depósitos aluviales se emplazan a lo largo de los valles y quebradas presentando su mayor acumulación en las pampas de Hospicio y La Yarada; con propiedades hidrogeológicas favorables.

Los depósitos eólicos están compuestos por materiales de desintegración de las rocas adyacentes al cono del Caplina, transportados por el viento. Las cenizas volcánicas están constituidas por fragmentos de pómez y pequeños cristales de cuarzo, formando sombreros en terrazas fluviales, desde Calana hasta Pocollay y La Yarada (baja permeabilidad).

- Rocas Ígneas Intrusitas: en la parte baja sólo se ha reconocido un pequeño apófisis de Diorita, casi en el mismo litoral, al lado Sur de la desembocadura del río Sama. En cambio en las estribaciones occidentales de la Cordillera Occidental se encuentran ampliamente expuestas, así como hacia el Norte, en la Quebrada Vilavilani conformada por granodiorita de color gris de carácter netamente impermeable (Figura 4.1).

En general se acepta que la edad de estos intrusivos es el Cretácico Superior y Terciario Inferior, ya que la formación Moquegua, del Terciario Superior yace sin ser afectada sobre estas rocas ígneas.

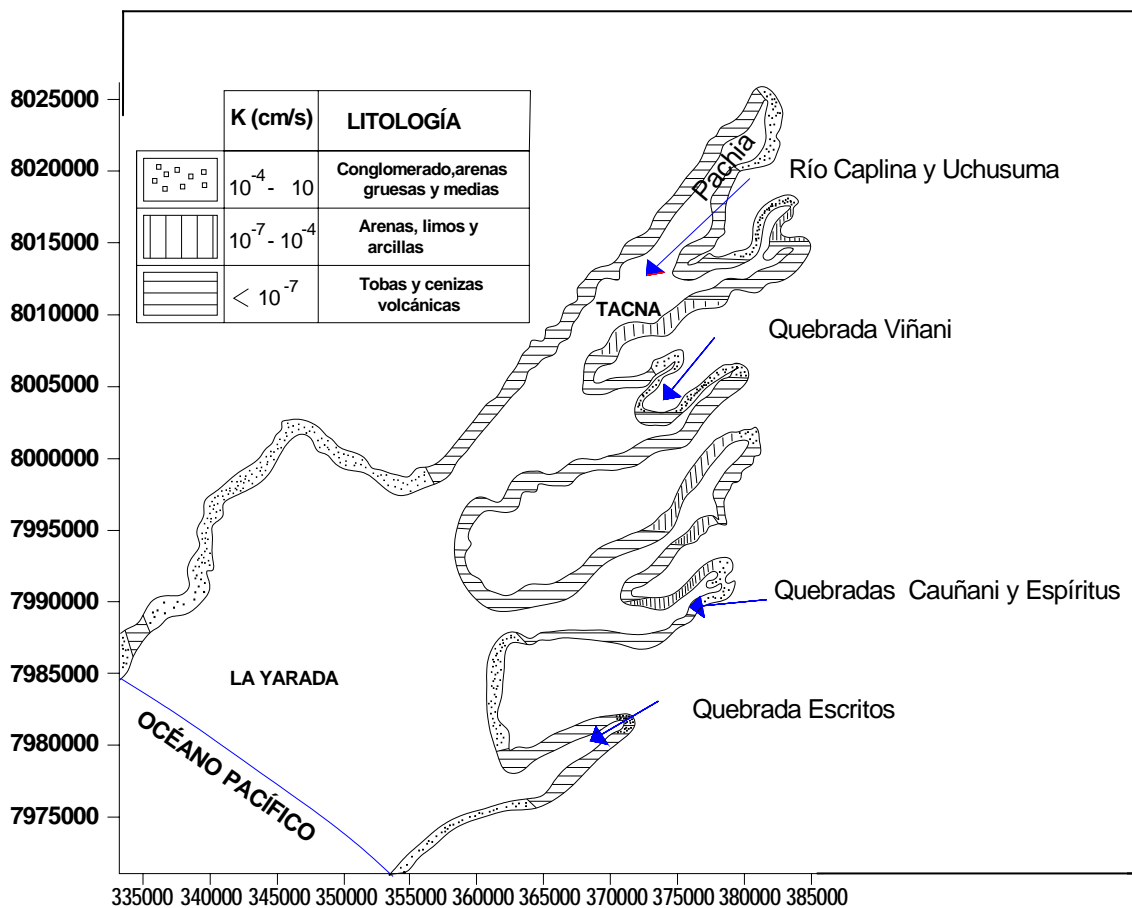


Figura 4.1 Geoforma y litología del acuífero La Yarada (según INRENA, 1996 en base al plano geológico del INGEMMET)

2. Profundidad del basamento impermeable

Los límites verticales del acuífero no se conocen con exactitud, debido a que las investigaciones realizadas al respecto, han alcanzado profundidades máximas de 800 a 1,000 m, sin llegar al basamento rocoso. En algunos sectores, principalmente en el litoral, próximo a la frontera peruano-chilena se presume que la fosa Tacna-Arica alcanza profundidades mayores. Sin embargo, los ensayos de prospección geofísica y perforaciones realizadas, han permitido inferir una morfología aproximada del techo del basamento, el cual se describe a continuación.

Entre Calientes y Tacna, los materiales permeables tienen una potencia estimada de 100 m; en el sector Tacna y Magollo, la profundidad se estima en más de 200 m; en las pampas de La Yarada y los Asentamientos 5 y 6, se estima entre 400 y 700 m; la zona de La Yarada Antigua y la parte media de la Quebrada Hospicio entre 700 y 900 m; y entre Los Palos, Pampa del Hospicio y la frontera con Chile, en aproximadamente 1,000 m (Cuadro 4.1).

3. Litología del acuífero

Los perfiles litológicos del acuífero son complejos ya que existe una mezcla y alternancia de muchos materiales tales como cascajo fino, cascajo grueso, cascajo sucio, piedra, arena gruesa, arena fina, arcilla compactada, caliche, limo, etc.

Desde el punto de vista hidrogeológico, estos perfiles litológicos presentan las siguientes clases de materiales: material grueso permeable, material fino permeable, material mezclado menos permeable y material impermeable. Se dispuso de registros litológicos en 12 pozos de observación (INRENA, 1996). En la Fig. 4.2 se muestra el perfil litológico del pozo IRHS-90, donde se muestra la estratigrafía hasta una profundidad de 400 m.

En el sector comprendido entre los distritos de Tacna y Calientes, mediante perforaciones exploratorias, se ha identificado un acuífero libre, emplazado tanto en depósitos aluviales como también en los estratos permeables de la Formación Moquegua.

Subyacente a la formación volcánico Huaylillas (Ts-Vhu) se encuentra la formación Moquegua (Ts-Mo); luego la formación Guaneros (Js-g) y a un nivel inferior la formación Chocolate (Ji-Vch). Ver el Cuadro 4.2

Cuadro 4.1. Profundidad de perforación de pozos y del basamento acuífero (1988)

IRHS	SECTOR TACNA	TIPO	COTA TERRENO (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD PERFORACIÓN (m)	PROFUNDIDAD BASAMENTO (m)
29	Yarada Antigua	T	39,89	46,00	300
40	Yarada Antigua	TA	6,89	10,00	n/d
44	Yarada Antigua	T	46,66	68,60	170
48	Las Palmeras	T	11,22	22,5	110
49	Las Palmeras	T	7,58	89,1	125
52	Los Palos	TA	12,98	8,38	n/d
54	Los Palos	T	16,596	43,8	180
63	Yarada Media	T	66,50	60	210
66	Asent. N°2	T	67,36	64	220
70	Yarada Media	T	50,73	31,00	190
71	Yarada Media	T	57,39	31,00	165
75	Yarada Media	T	60,65	34,50	180
79	Santa Rosa	TA	2,75	3,4	n/d
85	Magollo	T	313,86	64,49	195
86	Magollo	TA	269,03	39,8	n/d
93	Magollo	T	367,66	119,41	360
99	Santa Rosa	T	69,18	99	420
104	Asent. N°4	T	95,51	71,30	240
105	Asent. N°3	T	89,98	116	315
131	Qda. La Garita	T	145,44	168,37	430
135	Yarada Antigua	T	6,23	25,21	90
136	Yarada Antigua	T	6,46	36,36	130
137	Loa Palos	T	6,25	32,40	115
142	Yarada Antigua	TA	8,67	10,79	n/d
143	Yarada Antigua	TA	7,48	6,26	n/d
144	Yarada Antigua	TA	4,06	3,30	n/d
147	Asent. N°2	T	68,24	89,27	270
149	Magollo	TA	320,37	40,6	n/d
150	Magollo	T	279,52	165	230
151	Qda. La Garita	T	197,25	148,97	350
153	Fam. Cruz V.	T	128,86	75,19	270
154	Magollo	T	382,72	100	300
155	Magollo	T	328,51	127,07	375
157	Asent. 5 y 6	T	78,54	175,00	460
158	Viñani	T	408,86	100,55	190
159	Asent. N°4	T	66,23	58,98	210
164	Yarada Antigua	T	4,04	99,00	160
169	Yarada Antigua	T	13,53	30,17	130
171	Magollo	T	343,55	46,07	150
177	Magollo	PIEZ	279,18	51,66	205
185	Asent. N°4	PIEZ	72,73	66,17	160
186	Los Palos	PIEZ	82,51	79,18	450
189	Yarada Antigua	TA	21,04	15,36	n/d
190	Yarada Antigua	TA	23,92	17,20	n/d
192	Los palos	TA	6,55	10,10	n/d
194	Baln. Sta. Rosa	TA	8,35	8,29	n/d
197	Yarada Antigua	TA	1,97	3,00	n/d
209	Santa rosa	T	587,78	145,00	290
210	Los Palos	T	68,78	130,00	465
217	Los Palos	TA	4,03	4,00	n/d

* n/d, no definido

Fuente: ASCOSES-PRONASTER, 1980

Cuadro 4.2
Litología del acuífero La Yarada*

Pozo IRHS	Coordenadas UTM		Depósito fluvial aluvional (m)	FORMACION		
	Este	Norte		Huaylillas tovas volcánico (m)	Moquegua arena/limos conglomerados (m)	Guaneros tovas volcánico (m)
29	340400	7988438	300	300-350	350-n/d**	
44	339605	7990445	170		170-n/d	
59	352995	7980890	160	260-n/d	160-260	
71	349535	7983225	165		165-n/d	
80	370510	8009940	110	110-n/d		
90	359610	7988950	100	100-150	150-550	550-n/d
117	350905	7990430	470	470-540	540-n/d	
121	350425	7991340	480	480-540	540-n/d	
125	352040	7988240	460	460-530	530-n/d	
126	351975	7988375	460	460-530	530-n/d	
128	351400	7989460	150		150-n/d	
131	359500	7989040	75	75-95	95-n/d	
150	358795	7998600	230	230-300	300-n/d	
151	358047	7993280	20	20-24	24-n/d	
152	356800	7976060	470	470-540	540-n/d	
153	348230	7998670	270	270-370	370-n/d	
157	349767	7985377	460	460-530	530-n/d	
158	370140	8002320	80	80-110	110-n/d	
166	341284	7988270	300	300-350	350-n/d	
186	352520	7980300	450	450-520	520-n/d	
209	369530	8007640	40	40-55	55-n/d	
210	359260	7975840	465	465-540	540-n/d	
Calana			170	170-n/d		

* Interpretación del autor en base al Estudio Hidrogeológico de La Yarada, volumen IV
 ** n/d, no definido

En el sector comprendido entre Magollo y Tacna se han identificado dos acuíferos, uno emplazado en los materiales aluvionales, teniendo como techo las tobas rosadas del cuaternario y como piso las tobas de la Formación Huaylillas; y otro emplazado en los sedimentos permeables de la Formación Moquegua, teniendo como techo las tobas de la Formación Huaylillas y como piso los sedimentos finos de la Formación Moquegua; sin embargo, no se conocen sus características hidráulicas.

En el sector Pampas de La Yarada y Hospicio, donde se estaría presentando el fenómeno de intrusión marina, se tiene en primer lugar un acuífero de grandes dimensiones tanto en superficie como en profundidad, emplazado en materiales aluviales cuaternarios; en las pampas de la Yarada se localiza un acuífero libre, pero la parte baja de la pampa de Hospicio conforma dos acuíferos, un acuífero libre y otro confinado, este último originado por la presencia de las tobas cuaternarias de consistencia blanda. En segundo lugar, se estima la presencia de la formación Moquegua por debajo de los depósitos cuaternarios.

4.1.2 La napa subterránea

Origen de las aguas subterráneas

Las investigaciones de hidrología isotópica, realizadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA); indican que la recarga o alimentación al acuífero del valle de Tacna y Pampas de La Yarada y Hospicio, tienen su origen en las precipitaciones pluviales de la parte occidental de Los Andes; señalan también que no existe interconexión hidráulica con acuíferos del Altiplano Andino, en razón de que concentraciones de oxígeno dieciocho (O_{18}) de las aguas superficiales y del acuífero de la Yarada son de -9.5 a -13.5 por mil; y las aguas superficiales y subterráneas del altiplano andino tienen valores de -15 a -17 por mil.

La conclusión de la investigación isotópica resulta reforzada por la investigación geológica, la cual señala que existe un complejo rocoso de 30 km de amplitud y de gran potencia, enmarcado entre las fallas de Calientes (cabecera de valle) y Cerro Colorado (faldas del Volcán Tacora), que separa el acuífero del altiplano con el acuífero Caplina, impidiendo una interconexión hidráulica profunda.

Se descarta, también, una posible alimentación del río Lluta, ubicado al Noreste de las pampas de La Yarada y Hospicio, debido a que la calidad del agua del mencionado río posee alta concentración de sulfato; pues nace de manantiales termales en las azufreras del volcán Tacora; la conductividad eléctrica de sus aguas varía entre 3 y 3.5 mmhos/cm; mientras que la calidad de las aguas subterráneas, en dirección de las probables secciones de

interconexión hidráulica (pampas de La Yarada y Hospicio y quebradas adyacentes) es la mejor de todo el acuífero del Caplina, con valores de conductividad de 0.4 mmhos/cm a 1 mmhos/cm a 25° C.

Queda igualmente descartada una alimentación o recarga a partir de los ríos Locumba y Sama, las aguas de ambas fuentes tienen una alta concentración de sólidos disueltos, siendo el valor de la conductividad eléctrica de 3.5 mmhos/cm; en tanto que la calidad del agua subterránea en la parte norte del acuífero de La Yarada, es decir en el Asentamiento 4, tiene en promedio una conductividad de 1.3 mmhos/cm.

Finalmente, en cuanto a una probable alimentación o recarga proveniente de Quebrada Honda, ésta queda minimizada en razón de que la cuenca húmeda de dicha quebrada es muy pequeña y apenas alcanza los 3,000 m de altitud, donde el promedio anual de la precipitación no supera los 150 mm, valor que es consumido en su mayor proporción por la evapotranspiración, produciéndose una escorrentía esporádica, sólo en años muy húmedos, que termina reteniéndose en las arenas superficiales.

En resumen, la fuente principal de alimentación o recarga al acuífero está constituida por la débil escorrentía que se origina en la cuenca del río Caplina (Caplina y Uchusuma), y en pequeña proporción de las quebradas adyacentes; con lo cual quedan descartadas o minimizadas las hipótesis sobre importantes recargas provenientes tanto del altiplano andino como de los ríos Locumba y Sama.

Morfología de la napa

La napa freática en el acuífero es una superficie propia comparable a la de una superficie topográfica con depresiones, ondulaciones, cambios de dirección y pendiente, etc.

La medición de los niveles en los pozos de la red de control se efectúa en condiciones de equilibrio del acuífero; uniendo cotas de igual valor se obtienen los planos de isoprofundidad o hidroisohipsas. El análisis de estos planos en el estudio hidrogeológico del INRENA (1996), con registros de los niveles de la napa freática, permitió inferir lo siguiente:

- Plano de isoprofundidad: la profundidad de la napa se incrementa a medida que se aleja de la línea de playa, registrándose las mayores

profundidades al Noreste del cono aluvial de La Yarada y las Pampas de Hospicio; tal como se observa en los pozos IRHS 131 y 151, con profundidades de 116.7 y 112.6 m, respectivamente (Cuadro N° 4.3).

A partir de este sector, la profundidad de la napa va disminuyendo, llegando hasta 40 m, en la zona de la garganta de Magollo. Aguas arriba del valle del Caplina, la profundidad de la napa aumenta en forma equitativa, habiéndose registrado valores entre 50 y 60 m, a la altura del aeropuerto; 70 y 80 m, en la ciudad de Tacna, y 80 a 90 m, en Pocollay y Sobraya.

En el sector de La Yarada Antigua (zona crítica), la profundidad de la napa es mayor con respecto a otros sectores de las pampas de La Yarada de igual cota topográfica (pozo IRHS 79, 144, 197); esto debido a la sobre explotación existente en la zona que ha bajado notablemente la tabla de agua creando un gran cono de depresión. En el Anexo 1, se muestra la variación del nivel estático de la napa freática en el acuífero La Yarada para el periodo de 1988 al 2002.

- Plano de hidroisohipsas: la dirección principal del escurrimiento de las aguas subterráneas en el valle es de NE a SO, drenando hacia el Océano Pacífico; asimismo, se tienen otras dos direcciones secundarias de E-O, en las pampas de La Yarada, como consecuencia de la mayor explotación en el sector Yarada Antigua, que origina un gradiente hidráulico artificial; y la otra que sigue el curso de la quebrada Hospicio con dirección al sector Los Palos (NE-SO), producto de la alimentación de dicha quebrada. En el sector de Los Palos y Santa Rosa se aprecia otra dirección de flujo secundario E-O, proveniente de las quebradas Escritos y Cauñani.

Los estudios realizados por el INRENA (1996), señalan descensos generalizados de la piezometría que oscilan desde 0.08 m/año, en el sector Magollo; hasta 0,335 m/año, en el sector Asentamientos.

Por otro lado, se efectuó la verificación de los descensos del nivel estático en los pozos de observación de La Yarada-Hospicio, notándose que existen pozos cuyo nivel estático ha descendido entre 5.41 y 12.82 m, en un período de 15 años (1988-2002). Ver el Anexo 1.

Cuadro 4.3.

Nivel estático de la napa freática (Junio de 1988)

IRHS	Coordenadas UTM		Cota de Terreno (m.s.n.m.)	Nivel Freático		Tipo
	Este	Norte		Profundidad (m)	Cota (m.s.n.m.)	
29	340400	7988438	39.889	41.3	-1.411	Pozo
44	339605	7990445	46.662	39.1	7.562	Pozo
52	348485	7977290	12.981	6.37	6.611	Pozo
63	348335	7985560	66.435	42.71	23.725	Pozo
66	343860	7990130	67.357	48.87	18.487	Pozo
70	348815	7982785	50.731	33.1	17.631	Pozo
71	349535	7983225	57.391	38	19.391	Pozo
75	348933	7984090	60.652	39.37	21.282	Pozo
79	353460	7972150	2.754	3.43	-0.676	Pozo
86	357400	7998970	269.028	38.36	230.668	Pozo
104	345625	7994420	95.508	58.04	37.468	Pozo
105	346425	7991730	89.984	65.74	24.244	Pozo
131	359500	7989040	144.984	116.7	28.284	Pozo
135	334112	7986140	6.231	5.13	1.101	Piezómetro
136	340135	7982600	6.462	5.14	1.322	Piezómetro
137	346570	7977990	6.021	3.96	2.061	Piezómetro
142	335480	7985645	8.674	8.4	0.274	Pozo
143	334864	7985980	7.476	5.76	1.716	Pozo
144	334833	7985647	4.037	3.21	0.827	Pozo
147	344931	7989263	68.241	57.55	10.691	Pozo
150	358795	7998600	279.522	25.05	254.472	Piezómetro
151	358047	7993280	197.251	112.6	84.651	Piezómetro
152	356800	7976060	46.598	40.32	6.278	Piezómetro
153	348230	7998670	128.859	70.35	58.509	Piezómetro
157	349767	7985377	78.541	50.71	27.831	Piezómetro
159	342900	7991290	66.231	46.46	19.771	Pozo
164	336310	7984480	4.039	2	2.039	Pozo
169	345285	7980130	13.525	9.36	4.165	Pozo
177	358790	7998570	279.179	37.23	241.949	Piezómetro
185	341495	7994010	72.734	39.25	33.484	Piezómetro
186	352520	7980300	82.51	70.6	11.91	Piezómetro
189	341601	7984983	21.044	16.11	4.934	Pozo
190	342010	7984645	23.915	17.16	6.755	Pozo
192	348665	7976010	6.551	4.25	2.301	Pozo
197	353140	7972720	1.967	2.46	-0.493	Pozo
207	334480	7987292	18.247	16.52	1.727	Pozo

Fuente: INRENA, Estudio Hidrogeológico de La Yarada, 1996

4.2 Explotación de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas en Tacna cumplen un rol importante en el desarrollo de la ciudad. Gran parte de la agricultura, se desarrolla exclusivamente en base a la explotación de los recursos hídricos subterráneos en las pampas de La Yarada y Hospicio y en menor escala en la irrigación Magollo.

Según el cuadro 4.4, se comenzó a inventariar los pozos de la Yarada a partir de 1962, con un volumen total de 10 MMC (31 pozos, y 317 l/s); el volumen y pozos en explotación, se ha venido incrementando; así, para 1995, el volumen de explotación fue 73 MMC (con 103 pozos y 2,294 l/s).

Cuadro 4.4
 Explotación de agua subterránea periodo 1962–1995

Año	Nº de fuentes	Caudal (l/s)	Volumen (MMC)	Área (ha)	Fuente de información	Observaciones
1962	31	317	10	-	Pérez Verástegui	
1965	34	381	12	-		
1967	40	412	13	-		
1971	55	856	27	2000		
1972	-	920	29	-		
1972	-	983	31	-		
1976	70	951	30	2849	OPI-DRA	
1977	-	1110	35	-	OPI-DRA	
1978	74	1205	38	3055	OPI-DRA	
1979	85	1237	39	3635	OPI-DRA	Entran en funcionamiento
1980	93	1839	58	4502	OPI-DRA	Asent. 5 y 6
1981	94	1934	61	4568	OPI-DRA	
1982	98	2029	64	4854	CORDETACNA-OT-UAET	
1983	95	1998	63	4331	CORDETACNA-IGEPROGEM	
1984	103	1934	61	4301	CORDETACNA-IGEPROGEM	Vigencia del D.S. 080-84-AG
1985	111	2346	74	4804	CORDETACNA-IGEPROGEM	
1986	100	2346	74	-	CORDETACNA-GEPROGEM	
1987	112	2200	70	5830 (*)	PE-AFATER	Vigencia del D.S. 020-88- AG.
1995	103**	2294	73	-	PROY.ESPECIAL TACNA	

(*) Se refiere al área adjudicada, siendo el área irrigada 4406.96 ha

(**) El número de fuentes es sólo de la parte baja de la zona de estudio

De acuerdo a los resultados de la actualización del registro y control del acuífero (2003), realizado por el INRENA y el ATDR-Tacna, se ha podido cuantificar que el volumen promedio de bombeo del acuífero de La Yarada, fue de 65,374,969.66 m³/año y en el 2002 se explotó 68,976,267.36 m³/año, mayor que el volumen de explotación del 2001, donde se llegó a

61,875,290.88 m³/año. Al no disponerse de estudios definitivos en el acuífero, sólo podrá ser estimado el volumen de recarga y la capacidad de almacenamiento del mismo, así como la variación de la explotación.

Del monitoreo realizado en diferentes sectores de riego en el 2003, se concluye que no obstante el volumen total autorizado de 90.76 MMC/año, sólo se explotaron 65.374 MMC en el 2003 (Cuadro 4.5); reducción que se atribuye a la disminución del caudal de extracción como consecuencia del arenamiento y otros deterioros en la estructura de los pozos. También, puede verse cómo de manera individual en algunos sectores de riego la masa explotada es mayor a la autorizada, lo que demuestra el desorden en el manejo y distribución del recurso hídrico.

Cuadro 4.5
 Variación del volumen de explotación de pozos La Yarada (2003)

Sector de Riego	N° Pozos	Vol. autorizado (MMC)	Vol. explotado (MMC)
Las Palmeras	16	8.508	9.677
Juan Velasco	2	3.849	3.027
Los Palos	14	11.244	9.723
Santa Rosa	3	-	0.364
La Esperanza	9	11.548	7.267
Los Olivos	13	14.113	10.212
Asentamiento 4	9	6.882	3.990
28 de Agosto	6	10.799	4.797
Cooperativa N° 60	3	4.735	2.499
Asentamientos 5 y 6	10	14.253	8.850
Magollo	6	1.335	1.674
Tacna	5	3.493	2.780
Pocollay	4	-	0.514
Total	100	90.759	65.374

Fuente: Administración Técnica del Distrito de Riego Tacna-2003

Una precisión sobre el estado situacional de los pozos, permite concluir que sólo 100 de los 234 pozos inventariados tienen licencia, mediante la resolución administrativa correspondiente y de ellos 94 corresponden a La Yarada. Se han contabilizado 84 pozos no utilizables y se estima que existen

aproximadamente 50 pozos con características de clandestinos que irrigan un área de 1,200 ha. No existe mayor información al respecto.

En Junio de 1988, periodo que sirve de base para la calibración del modelo, se tiene un volumen de explotación de 55.136 MMC/año ($165,743 \text{ m}^3/\text{d}$), o el equivalente a $2.75 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver el Anexo 2). Sólo se considera 71 pozos de los 124 pozos de explotación inventariados debido a que los 53 pozos restantes no se encontraban en funcionamiento. La decisión de considerar la explotación de 1988, como punto de referencia para la calibración del modelo, se debe a que se dispone de una importante base de datos del inventario de las aguas subterráneas del acuífero La Yarada. El INRENA, posteriormente, en 1996, actualiza esta información, que sirve de sustento para el estudio hidrogeológico.

4.3 Hidrodinámica

a. Características generales de las prueba de acuífero

Para la determinación de las características hidráulicas del acuífero La Yarada-Hospicio, se han realizado pruebas de bombeo para evaluar las características hidráulicas del medio poroso como la conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento.

Según el estudio hidrogeológico de La Yarada, desde 1971 hasta 1996, se han realizado 85 pruebas de bombeo a caudal constante, la mayoría con pozos de observación (piezómetros); los cuales constaron de una fase de descenso y una fase de recuperación a tiempos variados.

b. Parámetros hidráulicos del acuífero

1) Transmisividad (T): es el flujo de agua, que bajo un gradiente hidráulico unitario, pasa a través de una sección transversal del acuífero de 1 m de ancho y una altura igual al espesor del acuífero, en m^2/s .

Se observa que la mayor transmisividad está localizada en el centro del valle del Caplina, en el sector de La Yarada. No se puede interpretar con exactitud los valores encontrados al sur del acuífero, debido a la falta de datos de pruebas de bombeo.

Los valores de transmisividad estimados en la zona de estudio, varían de $3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ a $3.47 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, teniendo como promedio $1.92 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Debido a que los pozos no atraviesan todo el espesor del acuífero, los valores encontrados resultan relativos y no son representativos del verdadero potencial del reservorio subterráneo.

- 2) Conductividad hidráulica (K): es el flujo de agua, que bajo un gradiente unitario, atraviesa una sección de acuífero transversal unitaria, en m/s.

El rango de conductividad hidráulica para el acuífero, varía de 6.8×10^{-5} a 1.09×10^{-3} m/s, y las más frecuentes son del orden de 5.0×10^{-4} m/s.

Los parámetros obtenidos indican que el acuífero en la zona de estudio presenta características hidráulicas de regulares a buenas, cuyos valores de T, S y K, corresponden a un acuífero libre (ver la Fig. 4.3).

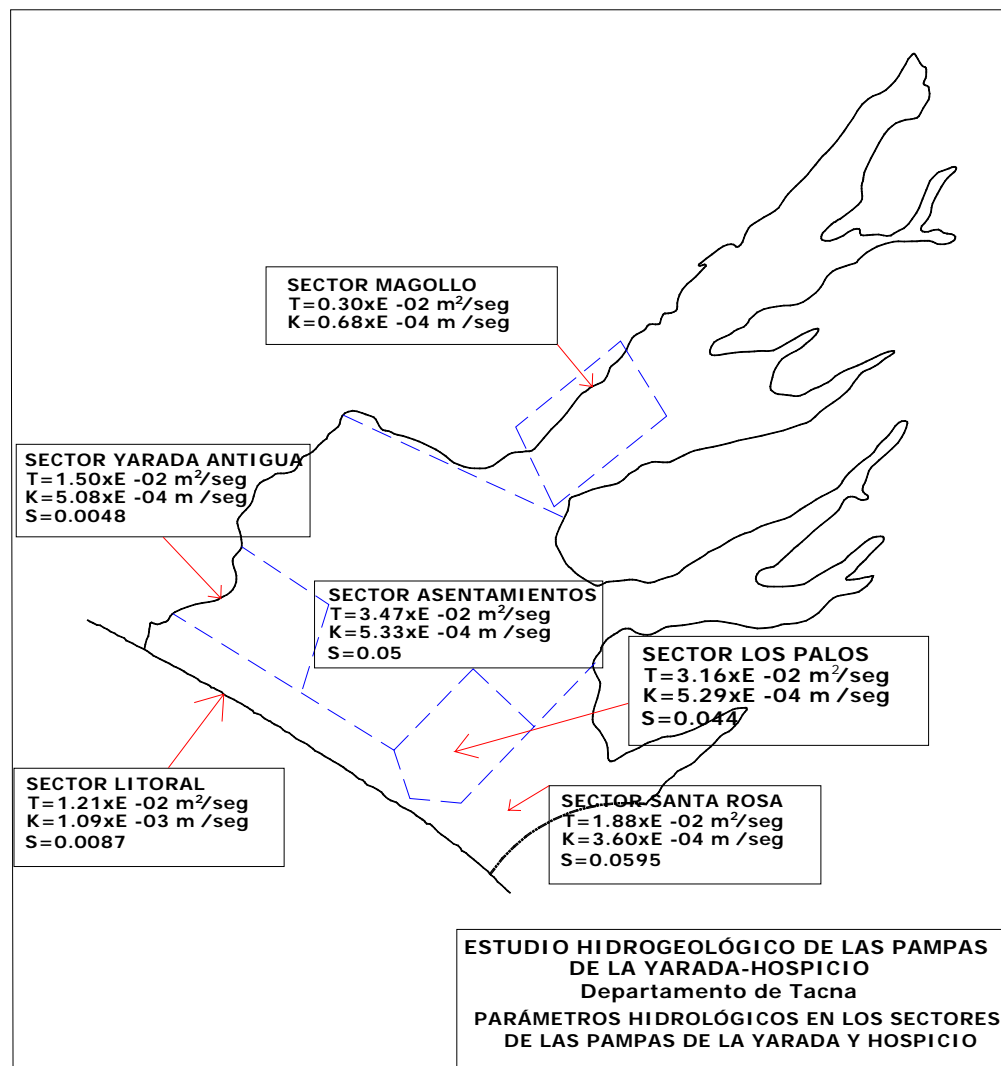


Figura 4.3 Sectores de parámetros hidráulicos T, K S en el área del acuífero

- 3) Coeficiente de almacenamiento (S): se define como el volumen de agua liberado o almacenado, por unidad de área superficial del acuífero por unidad de cambio en la componente de la carga piezométrica normal a esta superficie. Este parámetro es adimensional.

Los valores encontrados están comprendidos entre 5.95×10^{-2} a 4.8×10^{-3} . El primer valor confirma la existencia de un acuífero libre y el segundo valor es típico de un confinamiento local que se infiere está localizado próximo a la frontera con Chile (en acuíferos confinados $5 \times 10^{-5} < S < 5 \times 10^{-3}$). El Cuadro 4.6, muestra los valores de T, K y S, para diferentes sectores del acuífero La Yarada (compilado del estudio hidrogeológico elaborado por el INRENA).

Cuadro 4.6
 Parámetros hidráulicos T, K y S del acuífero La Yarada

Zona	Sector	T (m ² /s)	K (m/s)	S
1	Tacna - Magollo	3×10^{-3}	6.8×10^{-5}	-
2	Asentamientos	3.47×10^{-2}	5.33×10^{-4}	0.05
	Los Palos	3.16×10^{-2}	5.29×10^{-4}	0.044
	Santa Rosa	1.88×10^{-2}	3.60×10^{-4}	0.0595
3	Yarada Antigua	1.50×10^{-2}	5.08×10^{-4}	0.0048
	Litoral	1.21×10^{-2}	1.09×10^{-3}	0.0087
	Promedio	1.92E-02	5.15E-04	3.34E-02

Fuente: INRENA, Estudio Hidrogeológico de La Yarada, 1996

c. Radio de Influencia

Es función del tiempo y de las características de los parámetros hidráulicos del reservorio subterráneo. Los radios de influencia absolutos se determinan por la ecuación 4.1 de Theis-Jacob (1935):

$$R_a = 1.5 \left(\frac{T \cdot t}{S} \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

Donde:

R_a = Radio de influencia absoluto (m)

T = Transmisividad (m^2/s)

t = Tiempo de bombeo (s)

S = Coeficiente de almacenamiento.

Los valores de R_a , se calculan utilizando como datos los resultados de las pruebas de bombeo en los diferentes sectores de explotación del acuífero de La Yarada.

Considerando los datos del Cuadro 4.6; los valores máximos de R_a , se obtienen para el valor máximo de T y mínimo de S ; con tiempos de bombeo de 24 horas, el radio de influencia es menor a 1,185 m; mientras que los valores mínimos de R_a se obtienen para el valor mínimo de T y máximo de S , el radio de influencia es mayor a 99 mt.

Si se considera el acuífero libre con rendimiento específico de $S = 0.0295$, y $T = 1.92 \times 10^{-2} m^2/s$, como valores promedios obtenidos de las pruebas de bombeo; el radio de influencia es de 355 m. Este valor del radio de influencia infiere aun más que se trata de un acuífero libre. Custodio (1996), refiere que en acuíferos libres el radio de influencia es menor a 500 m.

Manteniendo la condición de acuífero libre, los pozos ubicados al Oeste del acuífero, en el sector de La Yarada Antigua (pozos IRHS-14 e IRHS-31), y otros en el centro del valle (pozos IRHS-94 e IRHS-166), pueden presentar interferencia si el tiempo de bombeo es mayor a 24 horas; ya que el radio de influencia es mayor que la distancia entre ellos (240 y 353 m, respectivamente). Asimismo, los pozos IRHS-01 e IRHS-03, en el sector del litoral tendrán interferencia, pues el radio de influencia es mayor a la distancia entre ellos (230 m).

4.4 Hidrogeoquímica

La evaluación de la calidad del agua subterránea del acuífero, fue realizada por el INRENA, en el estudio hidrogeológico del acuífero en 1,996. Esta evaluación permite conocer las características químicas del agua subterránea, la evolución experimentada por la concentración salina y las posibilidades de una contaminación por efectos de la intrusión marina.

El muestreo de las aguas se realizó entre mayo y junio de 1996. Para el análisis completo se seleccionaron 63 muestras de agua (59 de pozos, 2 de mar y 2 de afloramientos) que incluyen: conductividad eléctrica, dureza total, contenido de los iones solubles, boro, RAS y PH.

La información referente a la conductividad eléctrica, que expresa en forma indirecta la cantidad de sales disueltas en el agua, no ha sido posible obtener hasta la fecha para los diversos sectores en la zona de estudio; por tanto, las conclusiones sobre la calidad del agua para consumo humano, agrícola u otros usos aún no se han determinado.

4.5 Balance hídrico del reservorio acuífero

En base a los estudios hidrogeológicos realizados por el INRENA en 1996, en el acuífero La Yarada, se realizó el balance del recurso hídrico.

4.5.1 Ecuación del balance

El balance del reservorio acuífero se sintetiza como las entradas y salidas al sistema acuífero a través de la ecuación del ingreso (I) y del egreso (E); ecuación 4.2:

$$I - E = \pm \Delta W \quad (4.2)$$

Donde:

I = Ingreso (alimentación o recarga en todas sus formas).

E = Egreso (descarga en todas sus formas).

$\pm \Delta W$ = Variación de reservas.

Las condiciones necesarias para ejecutar el balance son dos: periodo de referencia y dominio físico o dimensiones del reservorio acuífero. El periodo de referencia, es aquél al cual están referidos los cálculos, para el presente estudio se tomó como referencia un año hidrológico medio. El dominio físico del balance, es el medio natural definido en el cual ocurren los intercambios hidrológicos; en el presente caso el dominio físico corresponde al reservorio acuífero de Caplina en su espacio tridimensional.

4.5.2 Cálculo de balance

La identificación de los diferentes componentes del balance permite establecer su cálculo para un año hidrológico medio como período de referencia, en la investigación corresponde a 1988.

1) Cálculo de los Ingresos o alimentación al acuífero

- a) Alimentación directa: a través de canales de conducción, no ocurre en el presente caso porque los canales de conducción del agua superficial (canal Uchusuma) se encuentran revestidos y captan la totalidad del agua del río Caplina en la cabecera del valle, por consiguiente la alimentación directa al acuífero Caplina es considerada nula o insignificante.
- b) Alimentación indirecta: forma de alimentación corresponde a las pérdidas por percolación profunda a partir de las áreas de cultivo y canales de distribución sin revestir. Los porcentajes de pérdida señalados en los últimos estudios realizados por el INRENA en 1996, son los siguientes:

Sector de riego Uchusuma	25%
Sector de riego Caplina	25%
Sector de riego Yarada	30%
Sector de riego COPARE	29%

Aplicando estos porcentajes a los diferentes caudales medidos en cada sector de riego, se estimó los siguientes valores de alimentación.

- Sector Uchusuma
 $0.671 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.25 = 0.168 \text{ m}^3/\text{s} \quad = 5.298 \text{ MMC/año}$
- Sector Caplina
 $0.785 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.25 = 0.196 \text{ m}^3/\text{s} \quad = 6.181 \text{ MMC/año}$

- Sector Yarada - Hospicio
 $1.69 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.30 = 0.507 \text{ m}^3/\text{s} \quad = 15.988 \text{ MMC/año}$
- Sector COPARE
 $0.240 \text{ m}^3/\text{s} \times 0.29 = 0.070 \text{ m}^3/\text{s} \quad = 2.207 \text{ MMC/año}$

TOTAL = 29.674 MMC/año

c) Alimentación por interconexión hidráulica: se trata del aporte desde la zona húmeda de la cuenca del río Caplina. Según los cálculos efectuados en los estudios del INRENA (1996), este aporte sería de 11.2 MMC/año (Cuadro 4.7). Existirían otros aportes correspondientes a quebradas laterales, pero se consideran de escasa magnitud para efectos del balance, en razón de que en estas quebradas las superficies colectoras son muy pequeñas, no generándose escorrentía, salvo en años excepcionalmente húmedos donde dicha escorrentía queda retenida mayormente en los estratos superficiales del suelo.

Cuadro 4.7

Balance hidrológico en la zona de estudio, en MMC/Año.
 (Periodo 1965/1994)

Parámetros del balance hidrológico	Cuenca del río Caplina				Cuenca Quebrada Hospicio				Cuenca Qda. Los Escritos	Recarga al acuífero por infiltración MMC/año
	Subcuenca río Caplina		Subcuenca río Uchusuma		Sub-cuenca Qda. Viñani	Subcuenca Quebrada La Garita				
	Río Caplina	Qda. Palca	Río Uchusuma	Qda. Cobani		Qda. Cauñani	Qda. Los Espíritus			
							Qda. Peña Chica	Qda. Chochocan		
Precipitación. (+)	83.1	11	28.3	19.3	29.4	38.5	17.7	7.9	17.2	
Escurrimiento. (-)	21.3	0	0.3	0	0	0	0	0	0	
ETP real (-)	74.9	10.9	27.1	18.1	25.5	35.7	18.5	15.2	16.7	
Intercambio de cuenca (+)	0.3	0	1.8	0	0	0	0	0	0	
Infiltración	-12.8	0.1	2.7	1.2	3.9	2.8	-0.8	-7.3	0.5	11.2

Fuente: INRENA, Estudio hidrogeológico de La Yarada, 1996

d) Alimentación artificial: en el valle Caplina no existen obras significativas destinadas exclusivamente a favorecer la alimentación artificial, salvo pequeñas lagunas de oxidación del sistema de alcantarillado de la ciudad de Tacna. La planta de tratamiento de aguas residuales cuenta con 4 lagunas de estabilización de 82x82 m, con una producción promedio de 130 l/s, lo que esta forma de alimentación también queda excluida del balance. El agua tratada es utilizada para el riego en una parte del sector de Magollo y para el riego de parques y jardines por la Municipalidad Provincial de Tacna.

2) Evaluación de la descarga o egresos del acuífero

- a) Descarga directa: en el ámbito del acuífero Caplina y de la zona de estudio de la investigación no existe este tipo de descarga que corresponde a manantiales debidamente localizados y con caudal establecido permanente hacia el reservorio acuífero.
- b) Descarga indirecta: este tipo de descarga se refiere a las pérdidas por evapotranspiración desde masas de agua expuestas en la superficie o con napa freática elevada. En el Valle Caplina debido a la extensa explotación del acuífero no existen condiciones para este tipo de descarga.
- c) Descarga por interconexión hidráulica: el acuífero de Caplina, por su extensiva explotación no ofrece condiciones para alimentar a otros acuíferos por interconexión hidráulica; en este caso podría ser al acuífero con la frontera con Chile, pero se descarta esta situación por los estudios realizados.
- d) Descarga artificial: es la única y más importante descarga del acuífero del Caplina. La magnitud de esta descarga está dada por los 55.136 MMC/año ($2.76 \text{ m}^3/\text{s}$) de agua subterránea, explotada a través del sistema de pozos en el año 1988.

3) Cuadro general del balance

El balance de los diferentes componentes que intervienen en el ingreso y salida del agua en el reservorio acuífero se presenta en el Cuadro 4.8, el mismo que expresa una variación negativa de reservas de -14.262 MMC/año ($-1.46 \text{ m}^3/\text{s}$)

Cuadro 4.8 Balance hídrico reservorio acuífero del río Caplina, La Yarada -Tacna

Componente de Intercambio Hidrológico	Ingresos (MMC/año)	Egresos (MMC/año)	Variación de Reservas (MMC/año)
Directo	-	-	-
Indirecto	29.674	-	+ 29.674
Interconexión hidráulica	11.200	-	+ 11.200
Artificial	-	55.136	- 55.136
Total (MMC)	40.874	55.136	-14.262
Total (m³/s)	1.297	2.757	- 1.460

4.6 Reservas del acuífero

Las reservas de agua subterránea en el acuífero de La Yarada, se estiman mediante la siguiente expresión (Castany 1978, p. 551):

$$VR = A \cdot H_p \cdot S \quad (4.3)$$

Donde:

- VR : Volumen de reservas totales del acuífero (m³/año).
- A : Área del techo del acuífero (m²).
- H_p : Espesor medio saturado ponderado del acuífero (m).
- S : Coeficiente de almacenamiento promedio.

La reserva total estimada para el acuífero en 1988, considerando un área A = 845.98 km², un espesor saturado medio H_p = 245 m. (cuadro 4.1), un coeficiente de almacenamiento medio equivalente a S = 8.7x10⁻³, resulta de:

$$VR = 1,803 \text{ MMC/año}$$

Para determinar el volumen de reservas reguladoras, se ha relacionado la alimentación media anual que recibe el acuífero, proveniente de la recarga por interconexión hidráulica del río Caplina y las quebradas aportantes al sistema, estimado en 11.200 MMC/año (0.355 l/s), así como también de la infiltración por pérdidas de riego estimado en 29.674 MMC/año (0.942 l/s); de esta manera se obtiene una reserva anual explotable de 40.874 MMC/año (1.297 l/s).

CAPÍTULO V

MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

CAPITULO V

MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

5.1 Alcances y procedimientos

5.1.1 Alcances

En la elaboración del presente trabajo, la mayor fuente de información se obtuvo del INRENA, dependencia del Ministerio de Agricultura, referente a los estudios hidrogeológicos y de prospección geofísica realizados en el acuífero de La Yarada en 1996 y en el 2003. La información de la demanda de agua de uso poblacional, riego y otros usos en la región, se consideró del estudio de Factibilidad del "Proyecto de Propósitos Múltiples Vilavilani II (1988).

La etapa de modelamiento y simulación del acuífero de La Yarada, se realizó con el empleo del software Visual MODFLOW - versión 3.1, elaborado por el Waterloo Hydrogeologic Inc. de Canadá. El modelo MODFLOW simula el flujo subterráneo en un medio poroso en tres dimensiones. Usa la aproximación por diferencias finitas para simular el flujo transitorio en tres dimensiones en un medio poroso heterogéneo y anisótropo.

En la presente investigación, el modelo del acuífero La Yarada se calculó en estado permanente, usando los niveles estáticos de Junio de 1988 como condición inicial para la calibración del modelo, teniendo en cuenta el modelo conceptual planteado, que corresponde a un acuífero libre de una sola capa limitado en su límite superior por la napa freática, y por el basamento impermeable en el nivel inferior.

El modelo fue planteado de un alcance regional, por cuanto la variable principal del estudio a evaluar corresponde a la variación espacial de la napa freática del acuífero ante las condiciones actuales de explotación y recarga y para diferentes escenarios de explotación para la condición futura. Se consideró el modelamiento en régimen permanente por la escasez de información disponible al momento de realizar el estudio. Sólo se tuvo información relevante en las zonas de mayor explotación del acuífero, como son La Yarada Baja, sector de los Asentamientos N° 3, 4, 5 y 6 y en forma dispersa en los sectores

de Los Palos y Santa Rosa. En las zonas de Magollo, Tacna y Pachía, la información para el conocimiento del acuífero fue limitada y puntual.

5.1.2 Procedimientos

El procedimiento realizado, se describe a continuación:

1. Análisis de la información hidrológica e hidrogeológica obtenida.
2. Delimitación espacial del acuífero en planta y vertical, sobre la base de la Carta Nacional, a escala 1:50,000 y plano hidrogeológico, elaborado por el INRENA en base a los estudios geológicos del INGEMMET.
3. Verificación de los planos topográficos, isopropundidad, isotransmisividad y de hidroisohipsas del acuífero.
4. Selección del tipo de malla para la discretización, con indicación del tipo de borde, potenciales impuestos, extracción por bombeo y zonas de recarga.
5. Ingreso al modelo Visual MODFLOW, de los datos de los puntos de la delimitación espacial del acuífero, y las condiciones de frontera.
6. Asignación de los valores de la conductividad hidráulica a cada nodo del mallado, estableciéndose zonas de igual conductividad.
7. Asignación de valores de carga piezométrica a cada nodo del mallado, superponiendo al plano de malla el de isopropundidad.
8. Asignación de los caudales de explotación y de recarga a cada uno de los nodos del mallado, superponiendo el plano de ubicación de los pozos y sus respectivos caudales de explotación.
9. Calibración del modelo, teniendo como parámetro de calibración los valores de la piezometría calculada y la observada en el acuífero.
10. Simulación del modelo para diversas hipótesis de explotación y recarga.

5.2 Descripción general del área de estudio

5.2.1 Características generales de la zona

a) Ubicación

La Región Tacna, se ubica al sur del Perú, tiene una superficie de 16,075.89 km², que incluye 0.16 km² de superficie correspondiente al islote Ite, ubicado frente al distrito del mismo nombre, en la provincia de Jorge Basadre.

La superficie del Departamento constituye el 1.25% del territorio nacional, en el que vive el 0.99% de la población del País. Las 4 provincias que la conforman, tienen las siguientes superficies:

- Tacna : 8,066.00 km²
- Tarata : 2,819.96 km²
- Jorge Basadre : 2,928.72 km²
- Candarave : 2,261.11 km²

Los límites departamentales de Tacna, están comprendidos entre:

- Por el Norte, con los Departamentos de Moquegua y Puno.
- Por el Este, con Bolivia.
- Por el Sur con Chile.
- Por el Oeste, con el Océano Pacífico.

b) Vías de acceso

La Carretera Panamericana Sur, es la principal vía de comunicación y cruza el sector medio del Valle del río Caplina, pasando por la ciudad de Tacna en el km 1,293 y continuando se recorrido hacia el Sur en territorio Chileno.

c) Recurso agrícola

La superficie cultivada para el sector de Riego La Yarada (Dirección General de Aguas y Suelos del INRENA) es de 2,441 ha, que está distribuida en los siguientes sub-sectores:

Sub-Sector de Riego Yarada Antigua : 1,861 ha.

Sub-Sector de Riego sector Los Palos: 580 ha.

El área total para cultivo (Catastro Rural) es de 1861,73 ha, de éstas solamente se cultivaron 1649,01 ha en 1981. Ello indica que 212.72 ha no fueron utilizadas, siendo los posibles factores que originaron dicha diferencia, la escasez de agua en la parte baja del valle, la salinización del agua y el suelo y los factores económicos.

d) Recurso hídrico

El ámbito del estudio abarca dos sistemas hidráulicos importantes.

El sistema hidráulico Caplina

La cuenca del río Caplina, tiene un superficie total de 3,062 km², de los cuales solamente el 15%, es decir, 448 km², corresponden a la cuenca humbrífera o húmeda que se encuentra localizada por encima de los 2,500 m.s.n.m. La cuenca limita por el Norte con la cuenca del río Sama, por el Sur con Chile, por el Este con la Cordillera del Barroso y por el Oeste con el Océano Pacífico.

El cauce natural del río Caplina, cruza la ciudad de Tacna y conforma la quebrada Caramolle antes de su desembocadura en el Océano Pacífico. El recorrido del río Caplina desde su nacimiento hasta su desembocadura en el mar es de 118 km, haciéndose notar que muy raras veces llega al mar por ser sus descargas mínimas en la mayor parte del año y sus aguas son utilizadas tanto para uso agrícola y poblacional de Tacna.

La información hidrométrica disponible considera registros de caudales sin interrupciones desde 1939. Se tiene que la media mensual multianual es de 0.892 m³/s, con mínimos de 0.105 m³/s y máximos de 21.904 m³/s; obteniéndose un rendimiento específico de la cuenca de 0.29 l/s/km².

La disponibilidad para el sistema Caplina se ha determinado en 21.30 MMC al año en el período 1965-1994, según los estudios del INRENA (1996); de los cuales se estima que 0.107m³/s (3.37 MMC) son para uso poblacional.

El sistema hidráulico Uchusuma

El sistema hidráulico Uchusuma, considera las aguas desviadas del río Uchusuma por el canal de trasvase del mismo nombre y sirven para uso agrícola de la comisión de Uchusuma y uso poblacional de Tacna.

El río Uchusuma bajo en la estación Piedras Blancas presenta una serie histórica de caudales desde 1939, con una descarga media de 0.579 m³/s, máximas de 5.468 m³/s y mínimas de 0.270 m³/s. El balance hidrológico del sistema Uchusuma, presenta un déficit en todos los meses de acuerdo a la información preliminar de demanda, con valores negativos que alcanzan 0,974m³/s (2.611 MMC).

e) Climatología

Las cuencas del Caplina y Uchusuma, que contribuyen en la recarga del acuífero La Yarada, cuentan con 2 estaciones meteorológicas, de las que se puede tener un registro de datos en forma continua. Estas estaciones son Calana y Calientes, las cuales se encuentran ubicadas a 875 m.s.n.m. y 1,325 m.s.n.m., respectivamente. La información hidrometeorológica data desde el año 1952 y se encuentra en el banco de datos del Proyecto Especial Tacna (PET) y del SENAMHI.

Temperatura

La temperatura en el ámbito de la cuenca del río Caplina es muy diversa, desde el litoral marítimo hasta la zona alta. En la cuenca media se ha experimentado cambios de temperatura que van desde el tipo semi-cálido (28°C) hasta temperaturas bajas (3.2°C), según se muestra en el Cuadro 5.1 para la estación Calana ubicada a 875 m.s.n.m.

Cuadro 5.1
 Elementos Meteorológicos Estación Calana (Período 1965/1994)

Longitud: 70°11'
 Latitud: 17°56'
 Altitud: 875 m.s.n.m.

Mes	Precipitación (mm)	Temperatura °C			Humedad relativa (%)	Evaporación (mm)	Horas de sol (hrs)	Velocidad del viento (m/s)
		Máxima	Media	Mínima				
ENE	1.8	27.7	20.2	11.1	71	117.6	203	1.1
FEB	0.8	28.0	20.6	11.6	70	109.2	196	1.1
MAR	0.3	27.8	20.0	10.0	72	116.0	451	1.0
ABR	0.1	26.4	17.9	8.6	72	87.0	228	0.9
MAY	0.2	25.5	15.5	3.3	76	74.0	254	1.2
JUN	1.6	24.4	13.6	3.4	80	63.0	216	0.7
JUL	1.7	24.7	13.0	3.2	81	65.1	236	0.8
AGO	2.8	24.6	13.4	3.4	77	62.0	229	0.9
SET	3.1	24.7	14.6	5.3	80	66.0	225	1.0
OCT	0.7	24.8	16.0	6.3	77	56.8	254	1.2
NOV	1.7	25.6	17.4	8.4	75	96.0	249	1.2
DIC	1.3	26.7	18.9	9.6	72	117.8	257	1.2
Promedio	1.34	25.91	16.76	7.02	75.25	85.87	249.83	1.03
Total	16.1					1030.7	2800	

Fuente: Estudio hidrogeológico /CORDETACNA/Proyecto La Yarada - 1995

Precipitación

El área en estudio cuenta con 14 estaciones pluviométricas ubicadas en las cuencas de los ríos Caplina, Uchusuma y Sama.

La precipitación en la cuenca del río Caplina (estación Calana) es escasa o nula, según los datos registrados en la estación meteorológica, la cual se encuentra a 875 m.s.n.m. y presenta en promedio una precipitación media anual de 16.1 mm (Cuadro N° 5.1).

La precipitación total media anual en las sub cuencas que comprenden el área de estudio, para el período de 1965 a 1994, se muestra en el Cuadro 5.2. La cuenca del río Caplina aporta con la mayor masa de agua (83.1 MMC), siendo la quebrada Chochocan la de menor aporte con 7.9 MMC.

Cuadro 5.2

Precipitación total media anual de las sub cuencas del área de estudio (método de isoyetas). Período 1965/1994

P _o .	Cuenca del río Caplina				Cuenca Quebrada Hospicio				Cuenca Quebrada Los Escritos
	Sub cuenca río Caplina		Sub cuenca río Uchusuma		Sub cuenca Quebrada Viñani	Sub cuenca Quebrada La Garita			
	Río Caplina	Qda. Palca	Río Uchusuma	Qda. Cobani		Qda. Cauñani	Quebrada Espíritu		
							Qda. Peña Chica	Qda. Chochocan	
(mm)	191.9	116.6	141.2	162.8	205.6	170.9	135.1	110.2	138.6
(MMC)	83.1	11	28.3	19.3	29.2	38.5	17.7	7.9	17.2

Fuente: Estudio hidrogeológico /CORDETACNA/Proyecto La Yarada - 1995

Evaporación

En general, el valle del río Caplina presenta una evaporación promedio anual de 943 mm/año, registrándose los mínimos valores en Junio, con 55 mm/mes y los máximos en Febrero, con 105 mm/mes. El Cuadro 5.1 muestra, para la estación Calana una evaporación total anual de 1030.7 mm.

La evapotranspiración, variable interviniente para el cálculo del balance del agua subterránea se muestra en el Cuadro 5.3, para las diferentes sub cuencas que conforman el área de estudio.

Cuadro 5.3

Evapotranspiración real, total media anual (período 1965/ 1994)

ETR	Cuenca del río Caplina				Cuenca Quebrada Hospicio				Cuenca Quebrada Los Escritos
	Sub cuenca río Caplina		Sub cuenca río Uchusuma		Sub cuenca Quebrada Viñani	Sub cuenca Quebrada La Garita			
	Río Caplina	Qda. Palca	Río Uchusuma	Qda. Cobani		Quebrada Espíritu			
						Qda. Cauñani	Qda. Peña Chica	Qda. Chochocan	
(mm)	172,9	115,5	135,4	152,6	180,3	158,3	131,6	111,2	134,5
(MMC)	74,9	10,9	27,1	18,1	25,5	35,7	18,5	15,2	16,7

Fuente: Estudio hidrogeológico /CORDETACNA/Proyecto La Yarada - 1995

Humedad relativa

La humedad relativa promedio anual es del orden de 80%, registrándose un mínimo de 77,6 en Enero y máximo de 84,4 % en Agosto.

Nubosidad

La nubosidad por lo general se presenta en un régimen anual: en la costa la mayor nubosidad es registrada en Julio, Agosto y Septiembre; en cambio en las regiones altas se observa en Enero, Febrero y Marzo.

Viento

En el valle del Caplina, los vientos son débiles a moderados, su orientación es muy irregular, presumiéndose que los vientos dominantes tienen dirección de Sur o Suroeste y que la velocidad promedio es de 10 a 15 km/h (brisa débil).

f) Topografía

La ONERN (1978), con los datos de cotas de terreno de la mayoría de los pozos inventariados construyó el plano topográfico del acuífero de La Yarada (curvas de nivel cada 5 m). El acuífero presenta cotas de terreno desde 0 m.s.n.m. (límite con el Océano Pacífico) hasta 1,400 m.s.n.m. en el centro poblado de Calientes (en el límite Noreste del acuífero) y se observa dos situaciones topográficas; la primera con pendiente muy suave (0,5 %) abarcando la parte baja del acuífero, partiendo desde la línea de playa hasta

la carretera Panamericana Sur; y las pendientes de suaves a moderadas (1,5%) se originan en la quebrada de Vilavilani.

5.2.2 El sistema acuífero de La Yarada

Las pampas de La Yarada y Hospicio están conformadas por las cuencas de los ríos Caplina y Uchusuma, entre los siguientes límites (Figura N° 5.1): paralelos 16°44'00" y 18°20'52" de Latitud Sur y meridianos 69°28'00" y 71°08'16" de Longitud Oeste; limitando por el Norte entre las cumbres de los cerros Velarclane y Trisonton a 4,800 m.s.n.m.; por el Este con el río Caño, límite entre Perú y Bolivia; por el Sur entre las quebradas Salinas y la línea de la Concordia, límite entre Perú y Chile; y por el Oeste con el Océano Pacífico, en la desembocadura de la quebrada Icuy, entre los cerros Chorrillos y Mostaza.

El área del acuífero en estudio, es aproximadamente 845.98 km². Se eleva desde el nivel del mar hasta los 1400 m.s.n.m., siendo el mayor ancho de Este a Oeste de 60 km y el mayor largo de Norte a Sur de 27.2 km. Se extiende de Noreste a Suroeste, desde Calientes hasta el mar, y de Noroeste a Sureste, desde la parte baja de la Quebrada Honda hasta el área de influencia de la Quebrada Escritos en territorio Chileno.

El acuífero presenta la forma de un delta, con el vértice hacia la ciudad de Tacna y cuya base abarca parte del litoral Tacneño. Según el estudio hidrogeológico del INRENA (1996), el acuífero está relacionado principalmente con la cuenca del río Caplina y probablemente con la cuenca del río Sama. Aunque son necesarios mayores estudios, se infiere que el acuífero, esencialmente es del tipo libre, formado en gran parte por la formación Moquegua, y el cono deyectivo, en las pampas de La Yarada, de naturaleza aluvial.

Tiene como fuentes principales de alimentación las filtraciones de agua del río Caplina, canal Uchusuma y los aportes de agua en tiempo de lluvias por las quebradas Palca, Vilavilani, Viñani, Cauñani, Espíritus, Escritos y Quebrada Honda; volúmenes de recarga al acuífero que aun no esta debidamente cuantificada.

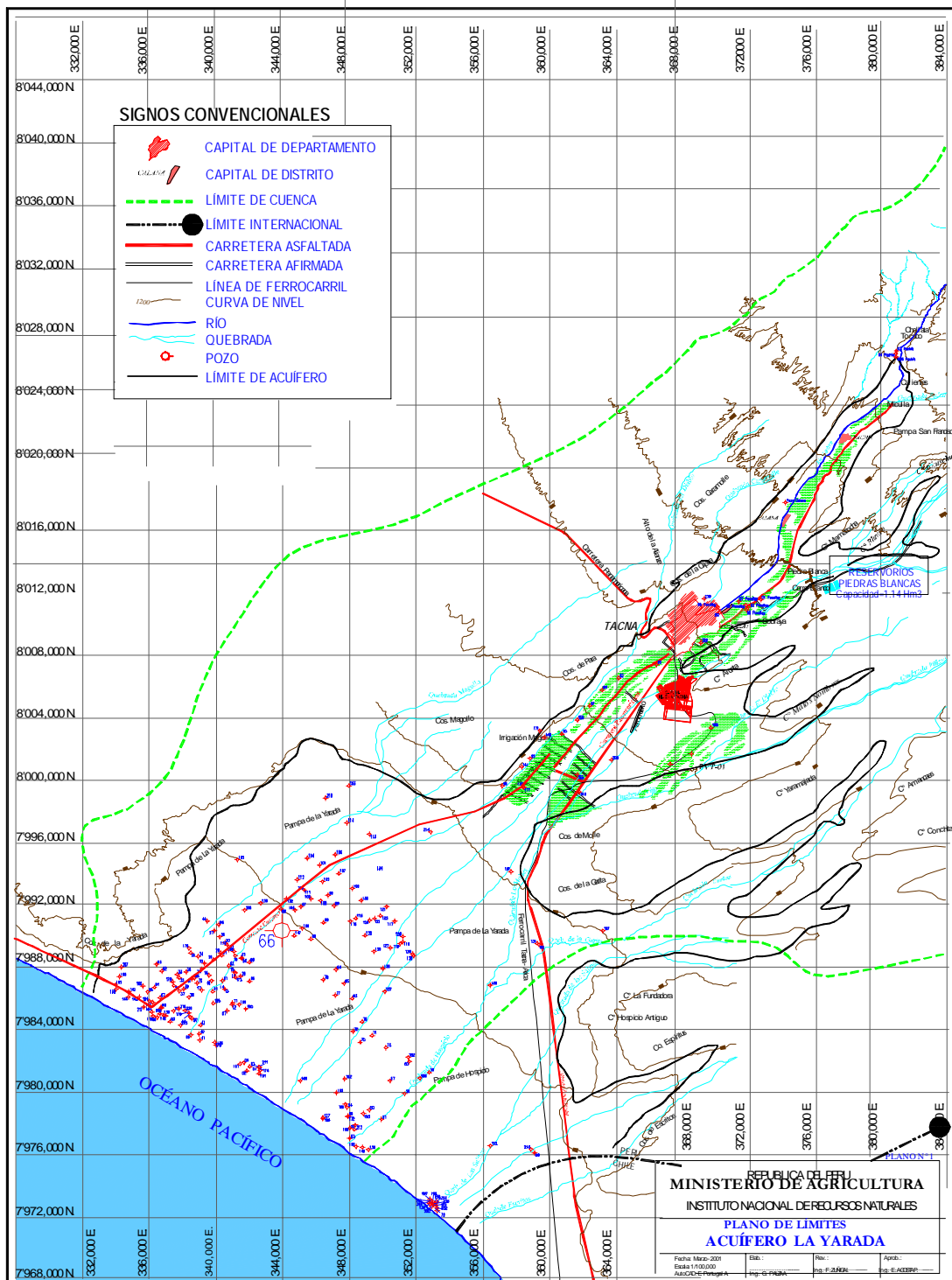


Figura 5.1. Plano de los límites del acuífero de las Pampas de La Yarada y Hospicio (según estudios del INRENA, 1996).

5.3 Descripción del modelo Visual MODFLOW

El modelo numérico del acuífero La Yarada, se elaboró usando el programa modular tridimensional de diferencias finitas MODFLOW para la solución de problemas de flujo de Aguas Subterráneas desarrollado por el USGS (United State Geological Service) en 1983; y compilado en la adaptación comercial de Waterloo Hydrogeologic Inc. de Canadá, llamada Visual MODFLOW, versión 3.1, del cual dispone licencia la Universidad Nacional del Santa, institución en la que es docente el autor de esta tesis.

El modelo MODFLOW usa la aproximación por diferencias finitas para simular el flujo transitorio o variable con el tiempo en tres dimensiones en un medio poroso heterogéneo y anisótropo. Simula, también, las condiciones en estado permanente (Mc Donald and Harbaugh, 1988). Los ejes principales de conductividad hidráulica se alinean con las coordenadas direccionales, asumiendo que el agua tiene densidad constante. Se evalúa la derivada temporal utilizando la aproximación diferencial. Pozos, ríos, drenes, evapotranspiración y recarga son simulados y representados dependientes de la carga y de los términos por los que el usuario ha especificado la carga exterior al modelo. Los acuíferos se representan por aproximación tridimensional espacial. Los nodos de esta aproximación pueden cambiar de confinados a no confinados y recíprocamente, en el desarrollo del proceso informático.

El Visual MODFLOW (VM) permite un ingreso interactivo de datos (pre-procesamiento) y una salida interactiva de resultados (post-procesamiento) de los datos de MODFLOW, fue diseñado por Thomas Franz y Nibson Guiguer en Canadá, en 1991.

Entre las principales bondades del Visual MODFLOW radican en que proporciona pantallas de ingreso interactivas, en las cuales se indexan números como datos de entrada para el modelo (Figura 5.2), crea o lee mapas de curvas de nivel de las propiedades del modelo, edita las propiedades de cada celda de la cuadrícula o grupos de ellas y crea un conjunto de datos basado en archivos de texto estándar para MODFLOW.

Además ejecuta el modelo y proporciona una visión general del comportamiento de la interpolación numérica mientras se está procesando la matriz de solución y presenta los resultados de salida: balance hídrico, mapas de isohipsas, mapas de descenso dinámico y estadísticas de calibración.

Este software especializado, básicamente se divide en tres módulos: INPUT, RUN y OUTPUT (Figura 5.3). En el primero se construye el modelo, asignando los límites físicos, es decir las condiciones de frontera y el ingreso de datos al modelo (Figura 5.4). El segundo módulo, es el encargado de ejecutar la interpolación para encontrar las cargas hidráulicas en cada celda, ya sea en estado permanente o transitorio. En este módulo se asignan las condiciones iniciales. El último módulo se encarga de mostrar los resultados del proceso, gráficamente. Se pueden destacar las líneas de flujo, velocidades y líneas equipotenciales. El Visual MODFLOW, realiza cálculos tridimensionales, pero no realiza entradas ni salidas gráficas en tres dimensiones, es lo que se llama (Anderson, M. y Woessner, W, 1992), un sistema cuasi tridimensional.

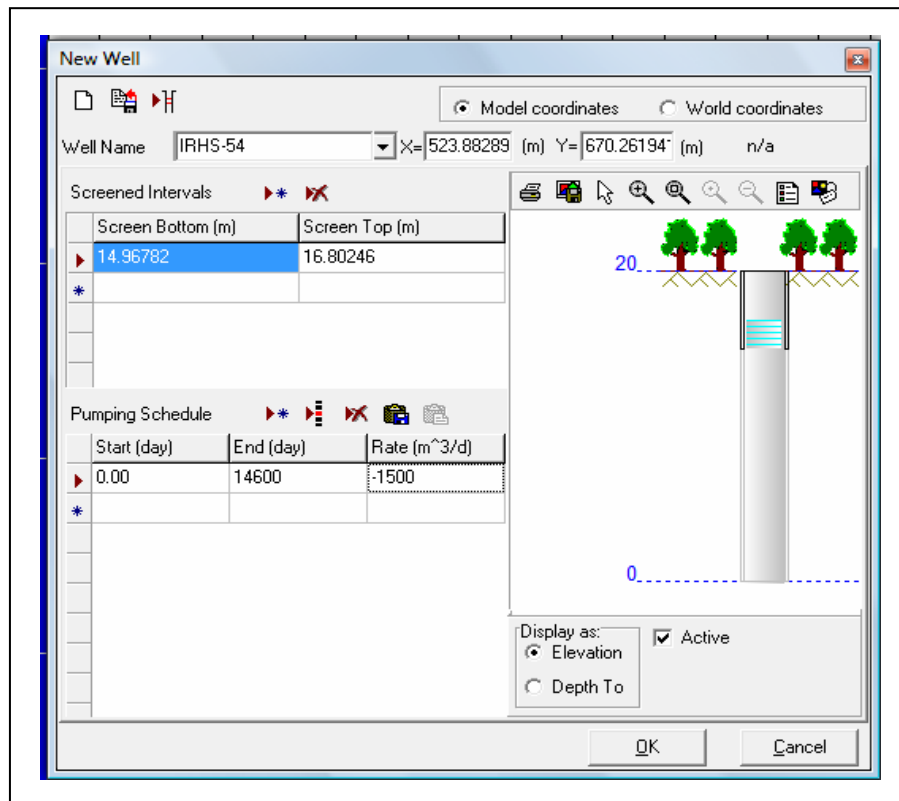


Figura 5.2 Esquema del Visual MODFLOW para la entrada de datos de pozos

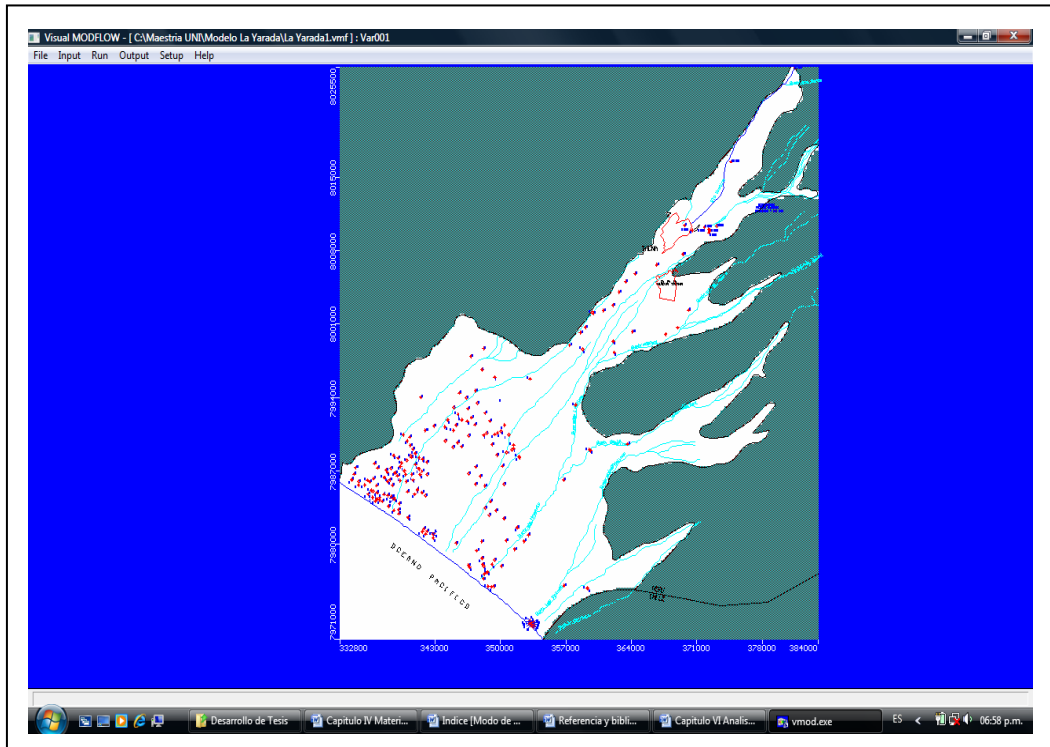


Figura 5.3 Pantalla del Visual MODFLOW, con módulos Input, Run y Output

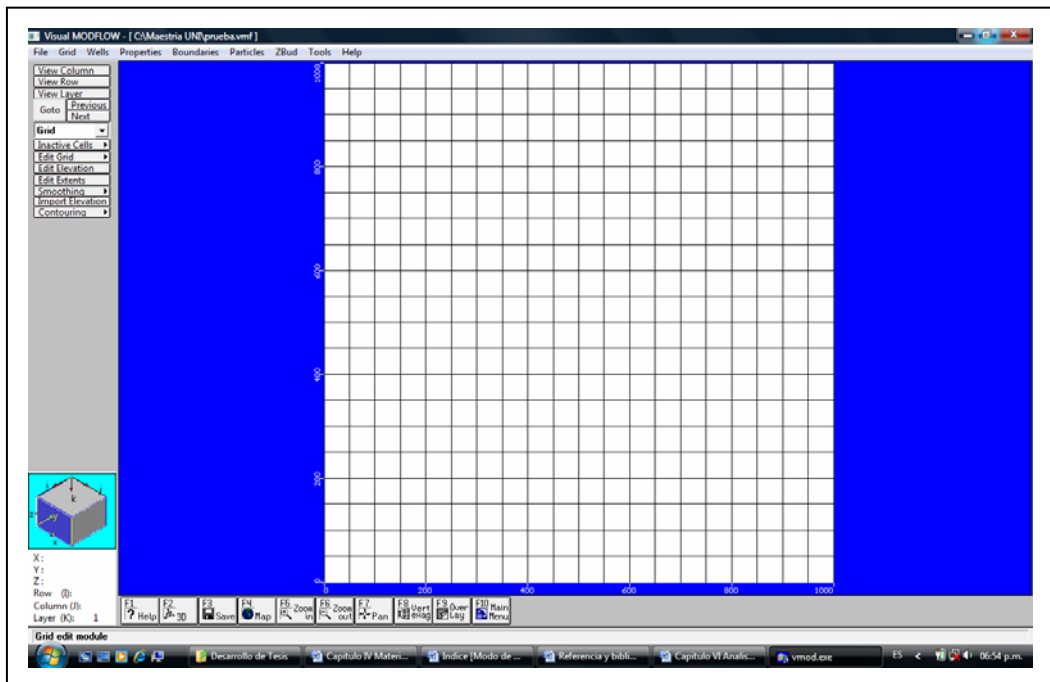


Figura 5.4 Despliegue del módulo Input para el ingreso de datos

5.4 Construcción del modelo de flujo

Se describe a continuación los pasos generales para construir el modelo de flujo de aguas subterráneas del acuífero La Yarada, basado en los datos recopilados en el capítulo anterior.

La construcción del modelo del acuífero, su calibración y validación posterior, permitió analizar y evaluar el comportamiento del acuífero ante diversos escenarios e hipótesis de explotación y recarga.

5.4.1 Capas de la superficie y elevación

Se diseñó un modelo tridimensional donde se representa la geometría del acuífero. El mapa hidrogeológico del acuífero La Yarada sirvió de mapa base (Fig. 5.5), es un mapa en archivo dxf obtenido del Autocad que contiene información útil como la ubicación de los pozos, centros poblados, vías de comunicación y la cuadrícula de coordenadas geográficas.

Considerando la gran extensión cubierta por este mapa, por la información disponible y por las consideraciones del estudio, la extensión del modelo se limita a analizar las zonas del acuífero con mayor explotación, dada que también es el área con mayor y mejor información.

El modelo se construyó con una sola capa, por la consideración de acuífero libre y del modelo conceptual planteado; con alturas comprendidas desde el nivel del mar (0 m.s.n.m.) hasta 1400 m.s.n.m. Inicialmente, con una malla de 150 columnas en el eje "X" (línea de playa con una longitud de 13.6 km) y 140 filas en el eje "Y" (con una longitud de 30 km) para obtener celdas de 400 m de ancho y 400 m de largo.

El Visual MODFLOW trabaja con interpolación centrada en el bloque (BCF), por lo tanto, en cada celda solo puede existir un pozo, lo que hizo necesario refinar la malla en áreas donde los pozos presentan una mayor explotación (parte baja de La Yarada). En la parte media del acuífero, en la zona comprendida entre Magollo y Tacna, la información disponible es escasa, por lo que las celdas presentan mayor dimensión.

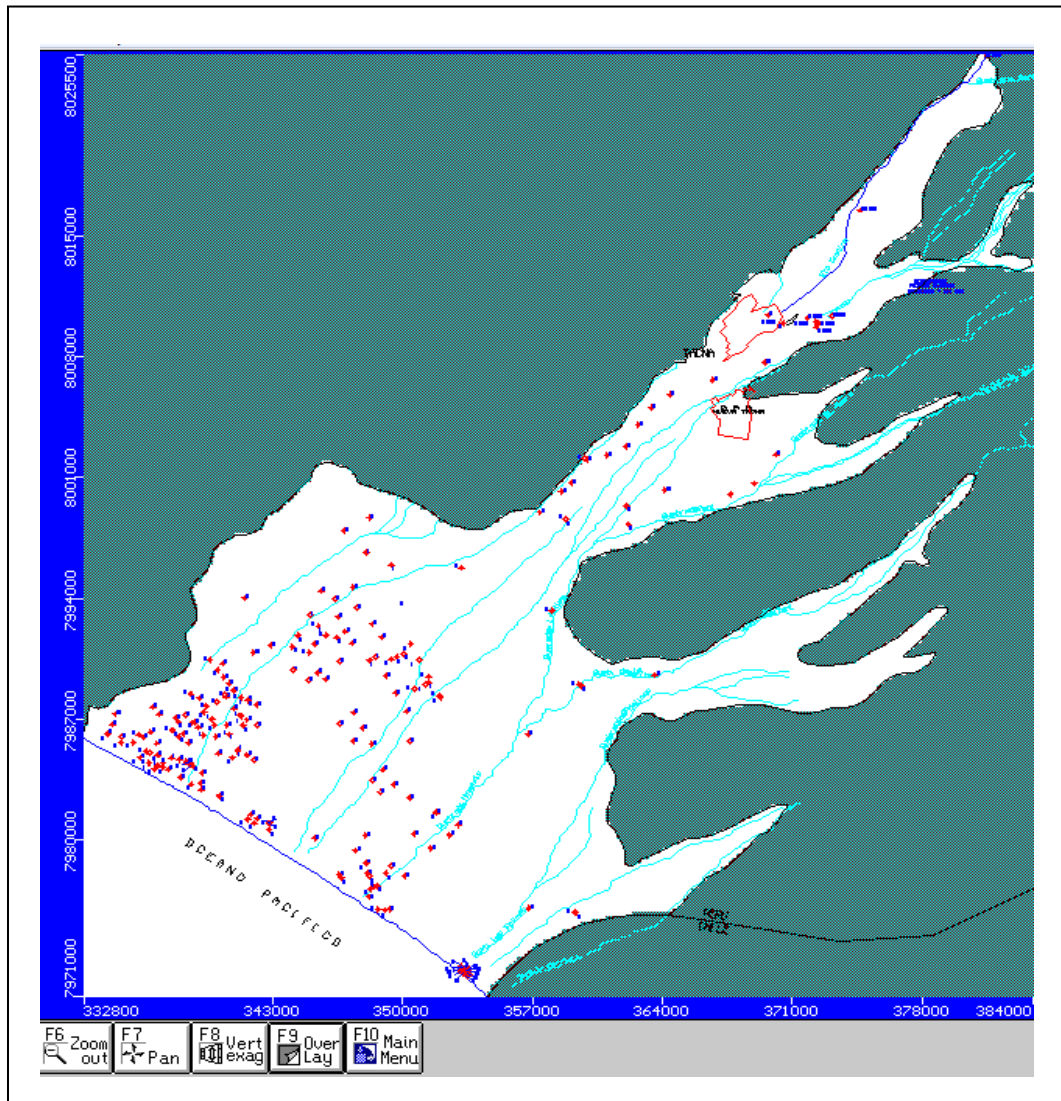


Figura 5.5 Mapa base para la modelación del acuífero.

De igual modo se incluyó la topografía del área a modelar mediante la inserción en el MODFLOW de la superficie del terreno (archivo en formato Excel); del cual se obtuvo la cota de coronación de los pozos localizados en el acuífero La Yarada.

Se hizo lo mismo para la topografía del basamento rocoso, en base a la información geológica y de prospección geofísica, de las profundidades estimadas del acuífero. La topografía del terreno se muestra en la Figura 5.6.

celdas del modelo se asignaron dimensiones de 200 m x 200 m, por ser esta la zona que no es evaluada en la investigación.

Al considerarse el modelo conceptual del acuífero La Yarada, como acuífero libre y de una sola capa, la discretización vertical del modelo no es necesaria (Anderson y Woessner, 1992). En la Figura 5.7 se representa el corte típico transversal del modelo en la fila 280, donde se muestra la superficie del terreno y el basamento del acuífero.

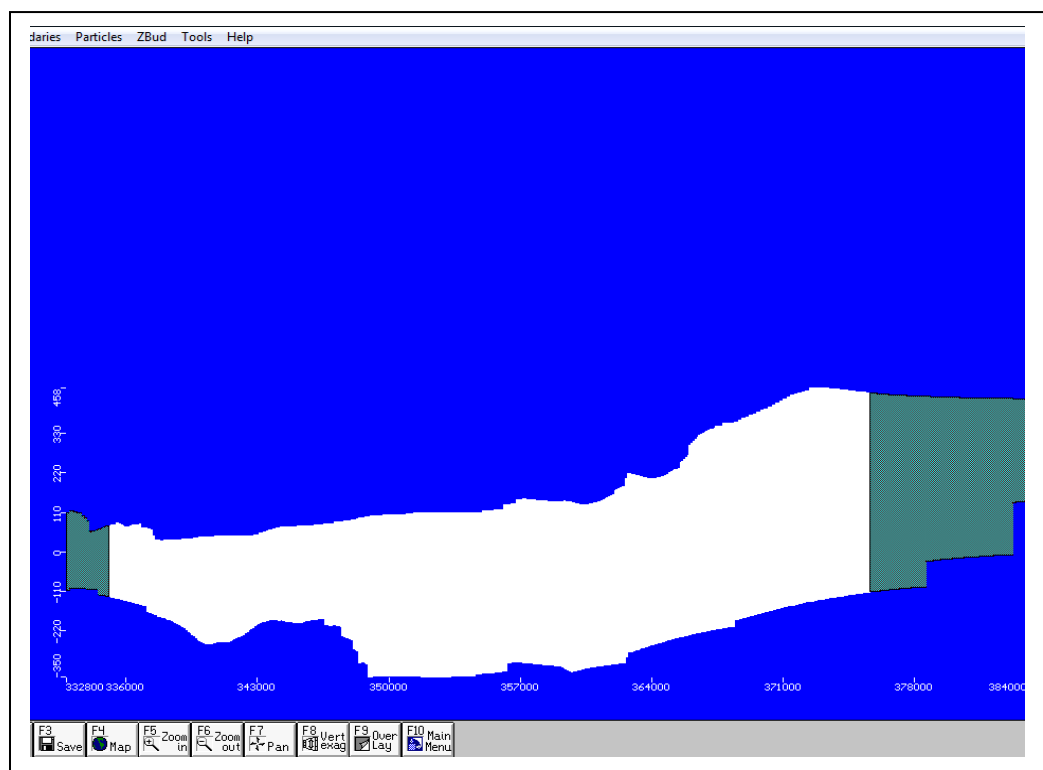


Figura 5.7 Sección transversal en la fila 280, mostrando el modelo de acuífero libre de una sola capa

La división final de la malla, luego del refinamiento que toma en cuenta la densidad y ubicación de los pozos, presenta 456 filas por 430 columnas y una sola capa del modelo del acuífero. La Figura 5.8 muestra el diseño de la malla discretizada, definida para el modelo del acuífero La Yarada.

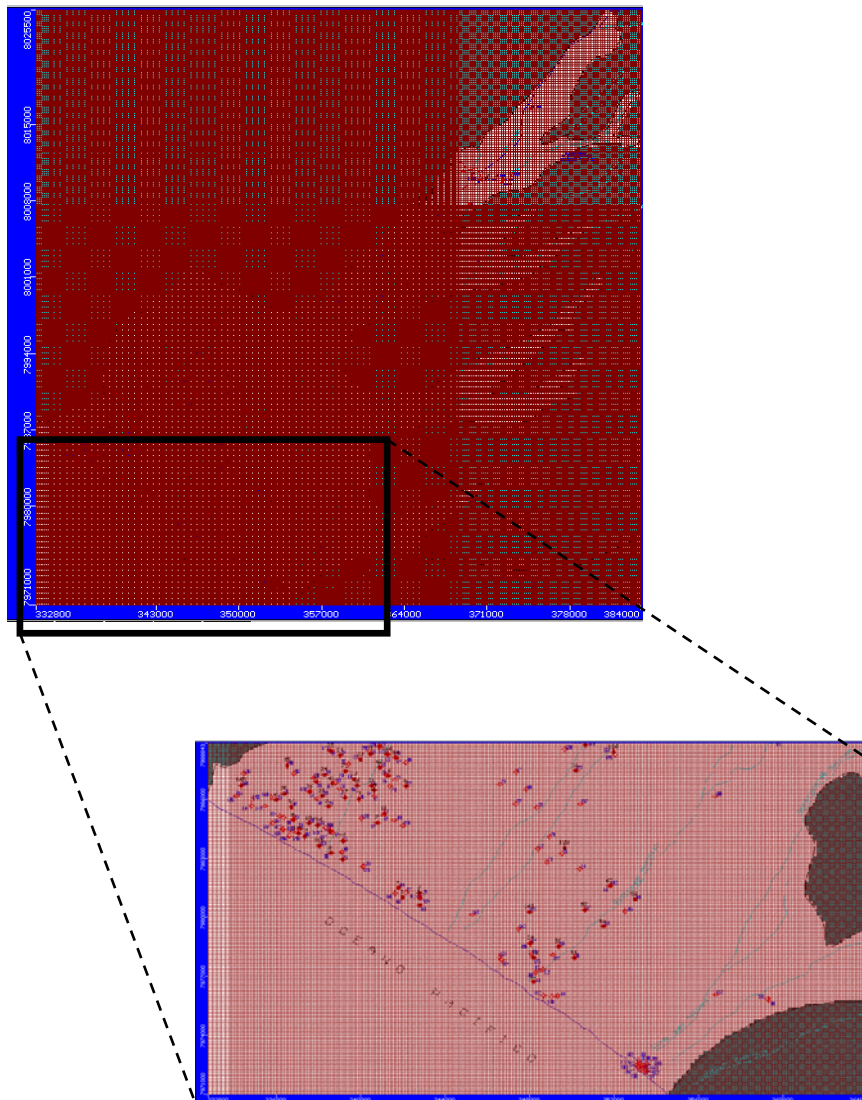


Figura 5.8 Detalle de la malla discretizada en el modelo

5.4.3 Parámetros hidráulicos

Conductividad hidráulica: en el modelo desarrollado se usó un enfoque determinístico, es decir la conductividad es una variable fija pero desconocida. Por lo tanto, se asignan 3 zonas de conductividad hidráulica basada en razonamientos geológicos descritos en el modelo hidrogeológico conceptual, tal como se aprecia en la Figura 5.9.

Los valores de conductividad hidráulica del Cuadro 4.6, fueron establecidos como valores iniciales para el modelo. Para la zona comprendida entre Tacna

y Magollo se adoptó $k_1 = 7 \times 10^{-5}$ m/s; entre la zona denominada Asentamientos, Los Palos y Santa Rosa $k_2 = 1 \times 10^{-4}$ m/s; y la zona La Yarada Baja y del litoral $k_3 = 8 \times 10^{-4}$ m/s (ver el Cuadro 5.4).

Almacenamiento: usando el mismo enfoque anterior, se copió la distribución de conductividades, como se distingue también en la Figura 5.9. El visual MODFLOW, necesita los valores del coeficiente de almacenamiento específico S_s , obtenido de dividir el coeficiente de almacenamiento S , entre el espesor saturado de la unidad acuífera; además para acuíferos libres, se requiere el coeficiente de producción específica S_y .

Cuadro 5.4

Valores de conductividad hidráulica K , almacenamiento S_s , producción específica S_y .

ZONA	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)	S_s (1/m)	S_y
1	7×10^{-5}	7×10^{-5}	7×10^{-6}	2×10^{-4}	0.20
2	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	8×10^{-5}	0.23
3	8×10^{-4}	8×10^{-4}	8×10^{-5}	1×10^{-5}	0.25

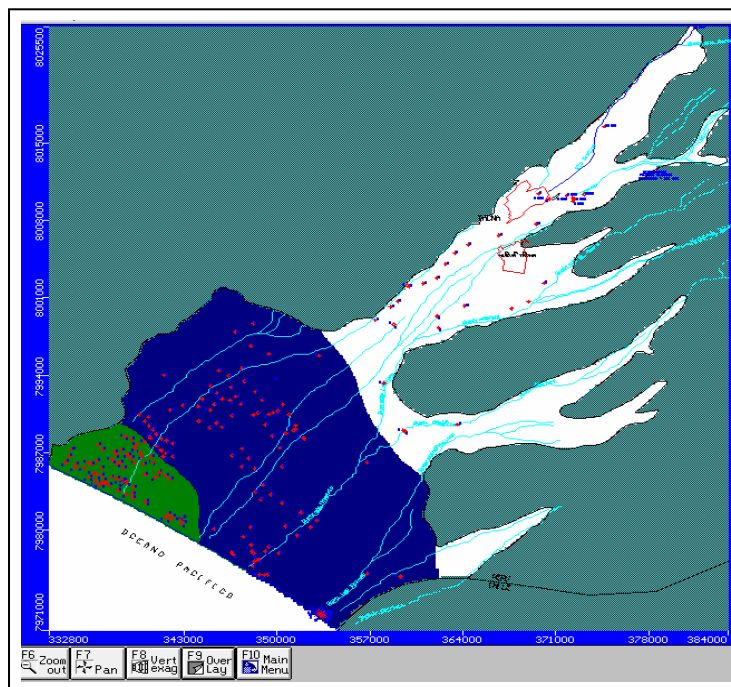


Figura 5.9 Distribución de la conductividad hidráulica en el modelo

5.4.4 Condiciones de frontera

• Condiciones de flujo

Dado que no se dispone de información relativa a los caudales de infiltración en el ámbito del estudio pero si de niveles de la napa freática; se decidió, por facilidad, tratar los limites con un nivel fijo, obtenido mediante la técnica de interpolación "Kriging", sistematizada por el programa Surfer, a fin de obtener valores de los niveles estáticos en zonas donde se desconoce. Dicho método geoestadístico provee, a partir de una muestra de puntos, ya sean regular o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una varianza mínima conocida.

El año base de los niveles estáticos de la napa freática del acuífero, correspondió a 1988 y el resultado es mostrado en la Figura 5.10.

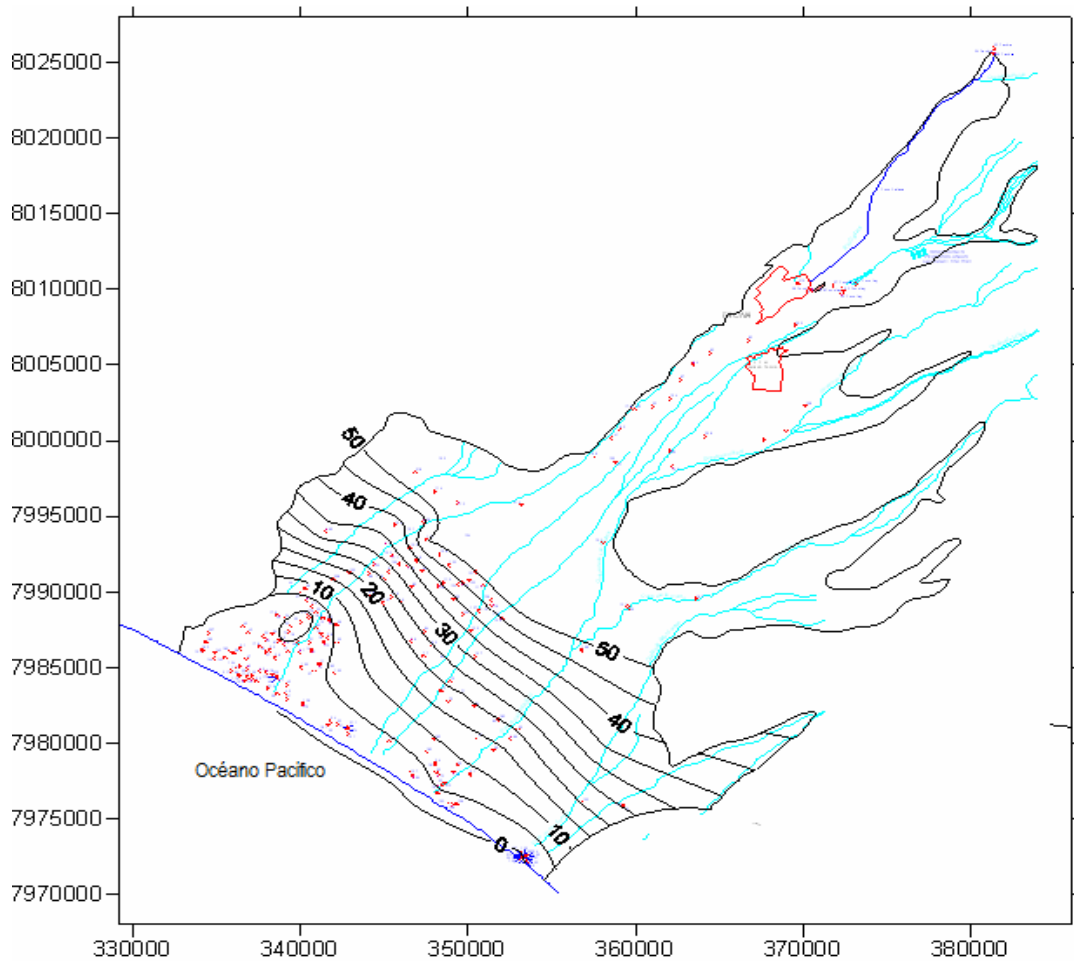


Figura 5.10 Curvas equipotenciales de los niveles piezométricos iniciales (1988)

• **Potenciales impuestos**

Las cargas conocidas se presentan en el límite del acuífero en contacto con el Océano Pacífico, a lo largo del litoral, y están ubicadas en cada celda cercana al límite del Océano Pacífico, que permanece constante durante el proceso de calibración y simulación del modelo.

Por ello, se consideró dos alternativas para determinar las fronteras o límites hidráulicos hacia los lados Sur-Oeste y Nor-Este del modelo. La primera consistió en asignar una carga hidráulica constante de valor 0 m.s.n.m., a todas las celdas con flujo comprendido entre la columna 1 hasta la columna 214 y la fila 308 hasta la fila 456, que corresponde a la ubicación del océano Pacífico (ver la Figura 5.11).

En base al balance hidrológico (Cuadro 4.7), la segunda alternativa fue considerar límites hidráulicos con flujo constante (pozos de recarga) en los límites Nor-Este del modelo, específicamente donde se ubican el curso de los ríos Caplina y Uchusuma (10,959 m³/d), las quebradas Viñani (10,685 m³/d), Cauñani y Espíritus (7,671 m³/d) y quebrada Escritos(1,370 m³/d), a fin de tener en cuenta su aporte de flujo subterráneo hacia el acuífero, haciendo un total de 30,685 m³/d (ver el Cuadro 5.5 y Figura 5.11).

Cuadro 5.5
Potenciales impuestos al modelo del acuífero La Yarada

Potencial impuesto	Aspecto físico	Ubicación	Valor
Carga constante	Acuífero en contacto con Océano Pacífico	Filas: 308 a 456 Columnas: 1 a 214	0 m.
Flujo constante	Río Caplina y Uchusuma	Fila: 79 Columna: 360	10,959 m ³ /d
	Quebrada Viñani	Columna: 360	10,685 m ³ /d
	Quebradas Cauñani y Espíritus	Columna: 360	7,671 m ³ /d
	Quebrada Escritos	Columna: 360	1,370 m ³ /d

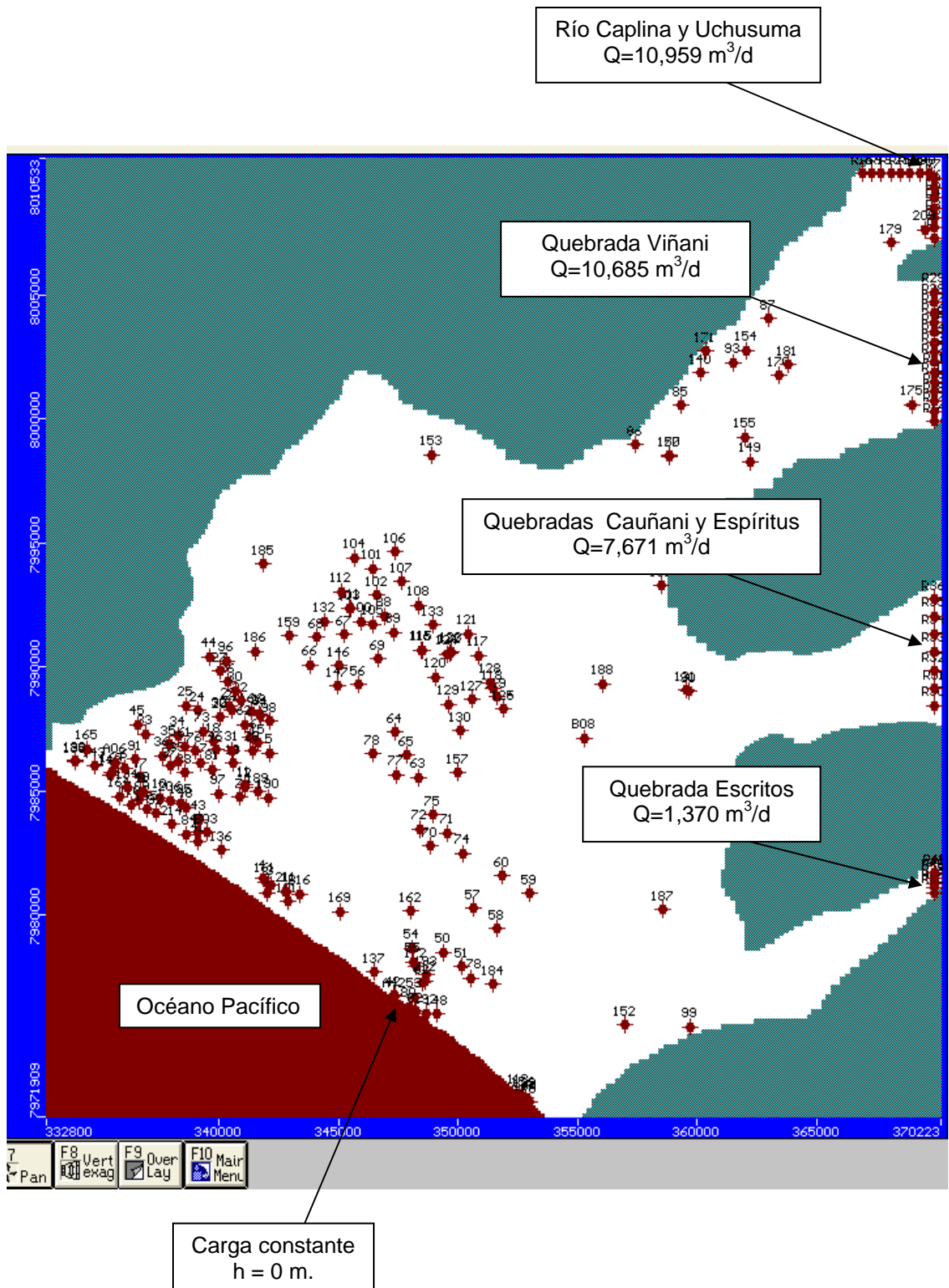


Figura 5.11. Ubicación de los límites hidráulicos del modelo en el acuífero La Yarada

• **Bordes impermeables**

De las características geológicas del acuífero se discretizó los bordes impermeables del modelo. Los bordes impermeables del acuífero presentan las condiciones de entrada y salida de flujo nulos al modelo.

Hacia el oriente, norte y sur del modelo se determinó zonas de no flujo dado por los afloramientos rocosos impermeables de la formación Chocolate y Huaylillas. Asimismo, el basamento del acuífero que comprende la formación Guaneros, de un espesor estimado de 550 m; esta condición significa que no existe flujo hacia estas regiones, por lo tanto los límites de las formaciones impermeables o de muy baja conductividad hidráulica ($k= 1 \times 10^{-6}$ m/s) son considerados como frontera de no flujo, como se indica en la Figura 5.5; se demarcan como celdas inactivas en el modelo.

• **Pozos de bombeo**

La extracción por bombeo se determina sobre la base de la información del inventario de pozos, realizado por el INRENA en 1988. Los pozos utilizados en la construcción del modelo fueron 112, de los cuales para el proceso de calibración se consideró sólo 71, que se encontraban en funcionamiento; existiendo una mayor densidad de pozos en la zona Sur-Oeste y Norte del acuífero (Figura 5.12). Los caudales de los pozos se registraron en cada nodo con sus coordenadas geográficas.

Los caudales por bombeo al inicio de la calibración se consideran el total de la explotación en 1988, que corresponde a 55,136,030.40 m³/año, o el equivalente a 165,742.92 m³/d (Anexo 2).

• **Infiltración por riego**

Los valores de la infiltración por riego, se estimaron en función al área regable de uso agrícola (se ha considerado los valores de la alimentación indirecta determinados en el acápite 4.5.2, los cuales oscilan entre 25 a 30% del caudal asignado a cada sector). Se introdujo estos valores en forma zonificada, siendo la mayor infiltración en las zonas de tierras agrícolas con uso intenso, donde no se aplica el riego presurizado. La masa total por alimentación indirecta estimada es de 29.674 MMC/año.

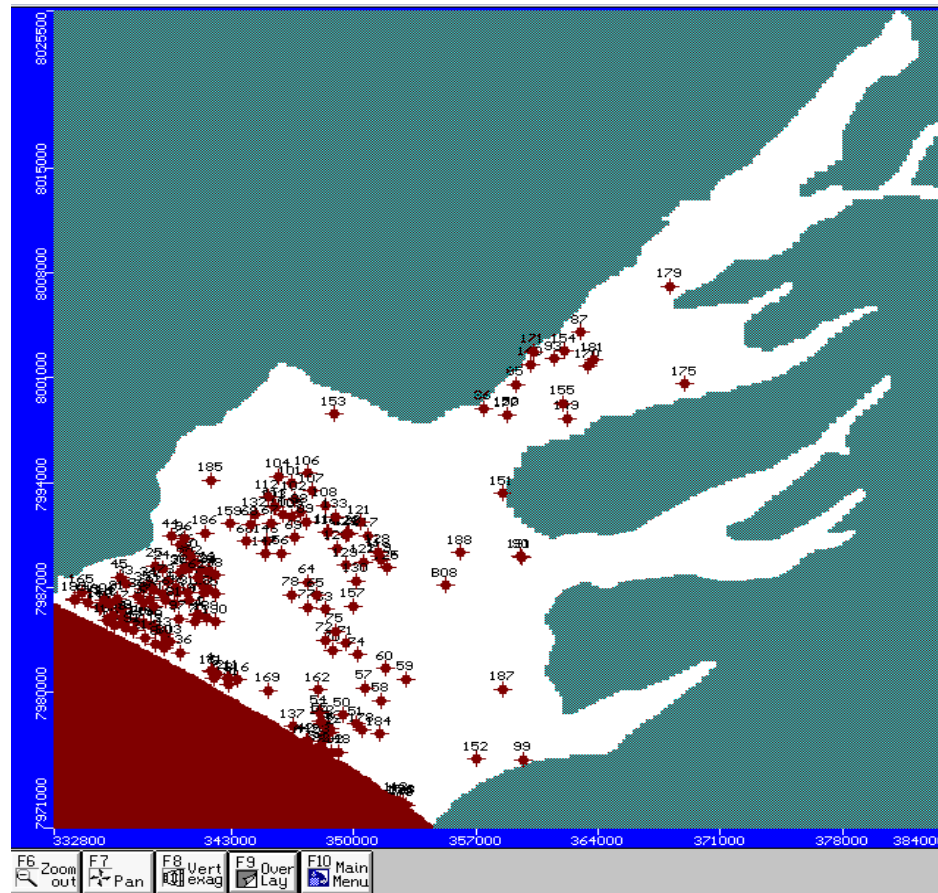


Figura 5.12 Ubicación de los pozos de bombeo en el modelo

5.5 Calibración del modelo

Método numérico empleado

Para la ejecución y calibración del modelo son necesarias las condiciones iniciales, que en el presente caso son los niveles estáticos de la napa freática del acuífero, para junio de 1988. Estos datos fueron importados desde el Visual MODFLOW y pre condicionan el método de solución para obtener una convergencia más eficiente de la ecuación del flujo subterráneo.

El siguiente paso fue elegir el método de interpolación para la solución de la ecuación matricial. El Visual MODFLOW permite elegir de cuatro métodos: de la Conjugada del Gradiente Precondicionado (PCG2, Preconditioned Conjugate Gradient Package), Procedimiento Fuertemente Implícito (SIP, Strongly Implicit Procedure Package), Secciones Sucesivas (SOR, Slice

Successive Overrelaxation Package) y Waterloo Hydrogeological Software (WHS); que fue el ejecutado, por ser más rápido y tener una convergencia mucho más suave que los otros métodos (Van der Vorst, 1992).

El método WHS se basa en la bi-conjugada estabilizada del gradiente (Bi-CGSTAB, Bi-Conjugate Gradient Stabilized), rutina de aceleración de las condiciones límites en las ecuaciones de flujo del agua subterránea. Este método de solución es iterativo y aproxima el gran arreglo de las ecuaciones diferenciales parciales a través de una solución aproximada. Este método, además, pre condiciona la ecuación matricial para dar una solución más eficiente. Contempla 2 niveles de factorización, que permiten a las matrices ser inicializadas en forma diferente para incrementar la eficiencia y estabilidad de la solución del modelo. Un nivel 1, donde se requieren menos iteraciones, pero mayor memoria de la computadora y otro nivel 0, donde es necesaria menos memoria, pero se realiza mayor número de iteraciones.

Este procedimiento trabaja con una aproximación de dos filas, para llegar a la solución en un menor tiempo. Esta aproximación se realiza mediante iteraciones externas e internas. En las primeras, los parámetros hidrogeológicos del sistema son actualizados (transmisividad, espesor saturado, almacenamientos) en un arreglo factorizado de matrices. Las iteraciones internas dan solución iterativa a las matrices creadas en las iteraciones externas (Franz y Guiguer, 1992). Los parámetros utilizados como criterio de solución del modelo son mostrados en el Cuadro 5.6.

Cuadro 5.6
Parámetros utilizados para la solución del modelo

PARAMETRO	VALOR
Máximo número de iteraciones externas	50
Máximo número de iteraciones internas	50
Criterio de convergencia en el cambio de carga	0.01
Criterio de convergencia en el error residual	0.01
Factor de amortiguamiento para las iteraciones externas	1
Criterio relativo residual	0
Nivel de factorización	0

El modelo se calculó en estado permanente y fue calibrado usando los mismos niveles estáticos de 1988, como condición inicial y teniendo en cuenta el modelo conceptual planteado. El acuífero La Yarada fue modelado con tres zonas de conductividad hidráulica y almacenamiento diferentes; además, la recarga estimada debida a la infiltración del riego y el aporte subterráneo del río Caplina y quebradas dentro del dominio del modelo.

En la Figura 5.13, se observa la relación entre el número de iteraciones para la solución numérica del flujo subterráneo y el error residual.

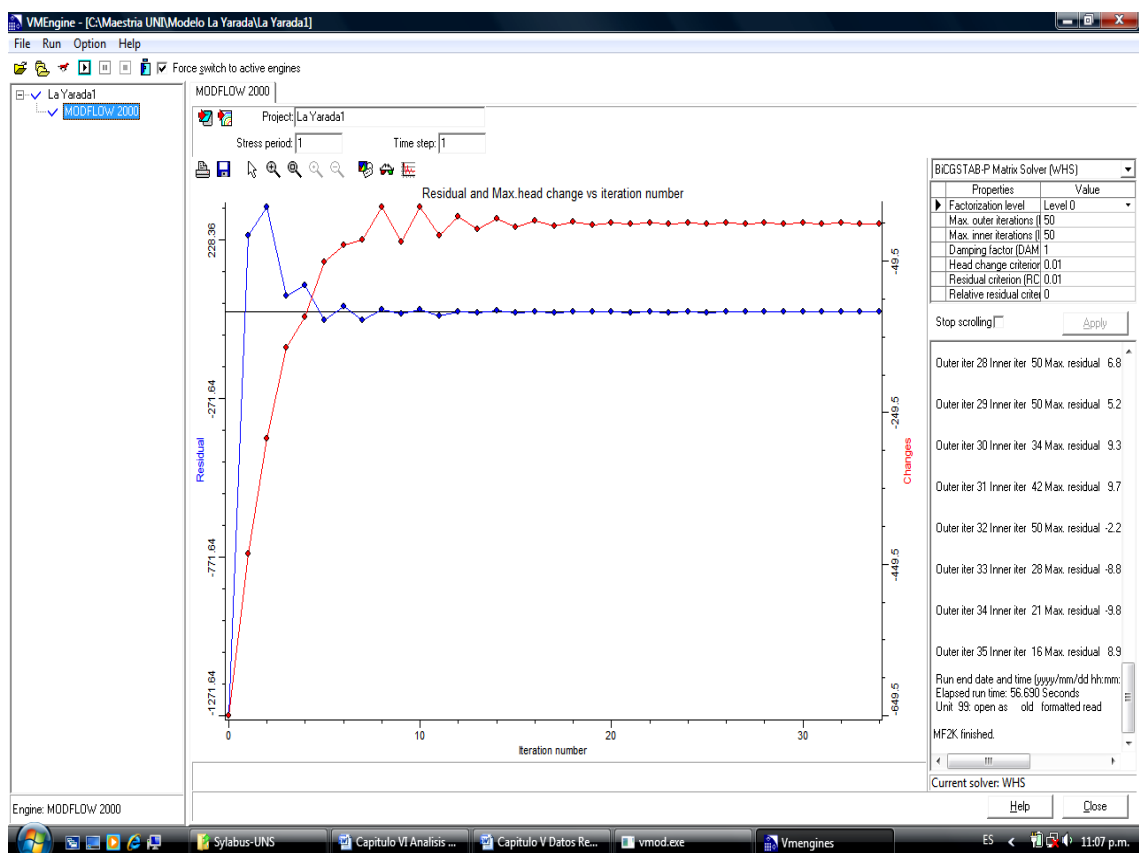


Figura 5.13 Error residual y máximo cambio de carga vs número de iteraciones

Se considera que la convergencia es alcanzada si, para cada nodo, el error residual entre la carga medida h_m y la carga simulada h_s , es menor que 0.01 de la máxima diferencia de carga en el sistema.

$$\left| \frac{h_m - h_s}{h_{\max} - h_{\min}} \right| \leq 0.01$$

5.6 Simulación del acuífero

Los criterios para la simulación del acuífero se dan para condiciones de flujo permanente de las aguas subterráneas, lo que implica una explotación y recarga invariable espacial y temporalmente. El acuífero recibe una alimentación constante proveniente de la infiltración en el sistema de riego y por interconexión hidráulica debido al aporte de las quebradas en la zona de estudio. Se simuló el acuífero sobre la base del modelo debidamente calibrado.

En esta etapa, se plantean las hipótesis de simulación del modelo, el cual estará en función del caudal de explotación del acuífero. Se evalúan tres hipótesis de explotación para el acuífero La Yarada-Hospicio:

1. El acuífero será sometido a una explotación de 3,358 l/s (205,510 m³/d, considerando un régimen de explotación de 17 horas por día), que es el máximo registrado en el acuífero en el período 1976-1995 en 86 pozos en 1982 (ver anexo 03); incremento en 601 l/s respecto al estado inicial de explotación de 2,757 l/s (Junio de 1988), con el cual se contemplaría cubrir la demanda futura de agua para la zona de estudio hasta el 2035 (según el Plan de desarrollo de Tacna 1995-2015, elaborado por el PET-Tacna, la demanda total para el año 2035 se estima en 2,840 l/s).
2. Explotación de 1,985 l/s (121,482 m³/d), que es el mínimo registrado en el acuífero en el mismo período de la primera hipótesis (86 pozos), en 1993; disminución en 772 l/s respecto al estado inicial de explotación de 2,757 l/s, con lo cual se evalúa el comportamiento del acuífero ante un evento de mínima explotación presentada en un período histórico, así como también se pretende controlar el avance de la intrusión marina en el acuífero.
3. Explotación de 1,379 l/s, que es el 50% del caudal registrado en 1988 (82,871 m³/d), disminución en 1,379 l/s respecto al estado inicial de explotación; con lo cual se pretende controlar el avance de la intrusión marina en la zona de La Yarada Antigua, zona sobre-explotada del acuífero y con riesgo de salinización de los suelos agrícolas cercanos al litoral.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

CAPITULO VI

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1 Resultados del modelamiento

Luego de realizar las iteraciones necesarias, y establecidos los criterios de convergencia planteados para el error residual (1%) y de cambio de carga (1%), se encontraron los valores de las cargas hidráulicas en cada celda.

El Visual MODFLOW presenta de manera gráfica estos resultados por medio de líneas de contorno de igual carga hidráulica y calcula las velocidades de flujo de agua subterránea. Los primeros muestran la información relacionada con las líneas piezométricas (curvas hidroisohipsas), es decir, los niveles del agua subterránea del acuífero libre. En cuanto a las velocidades se muestra la dirección del flujo. Los resultados obtenidos en la simulación son mostrados y analizados a continuación.

Luego que los valores iniciales, producto del análisis conceptual, fueron introducidos en el modelo; se realizó la primera simulación del Visual MODFLOW, obteniéndose valores de carga bajos, respecto a las mediciones realizadas en campo para la zona de La Yarada Baja y Media, sector Los Palos y Santa Rosa, mientras que para la zona de Magollo y Tacna los valores fueron muy altos.

Para ello, se optó por variar los parámetros de la conductividad hidráulica, en las tres zonas establecidas en el modelo, hasta obtener resultados con mayor grado de correlación con los datos históricos observados de la carga hidráulica en 1988. Se consideró que los datos con mayor incertidumbre eran los valores de recarga por interconexión hidráulica, debido a la falta de mediciones directas en el campo, seguido por los datos correspondientes a la conductividad hidráulica, debido a la incertidumbre en las profundidades reales del acuífero, y a que algunas de las pruebas de bombeo recolectadas fueron desarrolladas en tiempos muy cortos. A continuación se indican las variaciones realizadas.

6.1.1 Recarga

Al considerar los valores iniciales para la recarga según el balance del reservorio acuífero, obtenido en el acápite 4.5.2, alimentación indirecta: 29.67 MMC/año y por interconexión hidráulica, 11.20 MMC/año, se obtuvieron cargas piezométricas con valores bajos, respecto a los observados en 1988.

Considerando que los valores de infiltración por riego corresponden al promedio de la zona de estudio, se optó por no variar el valor de 29.67 MMC/año; sin embargo, ante la incertidumbre de estimar certeramente el valor por interconexión hidráulica proveniente del aporte de flujo subterráneo de las quebradas al acuífero (falta de información hidrométrica y la inconsistencia de las mediciones del flujo), la recarga inicial de 11.20 MMC/año (30,685 m³/d) se modificó a un valor de 44.54 MMC/año (122,050 m³/d). Con estos valores se obtuvo un buen ajuste de las curvas piezométricas respecto al período base de calibración. El Cuadro 6.1 muestra el tipo de recarga que se aplicó al modelo, así como los valores iniciales y los utilizados para la calibración.

Cuadro 6.1
 Valores de la recarga del acuífero en m³/d

Recarga	Elemento	Valores iniciales	Valores finales
Indirecta	Infiltración por riego	81,074	81,074
Interconexión hidráulica	Río Caplina y Uchusuma	10,959	43,589
	Quebrada Viñani	10,685	42,500
	Quebradas Cauñani y Espíritus	7,671	30,512
	Quebrada Escritos	1,370	5,449
	Total (m ³ /d)	30,685	122,050

6.1.2 Conductividad hidráulica

Los valores iniciales para la conductividad hidráulica muestran un buen grado de correlación con los calibrados para la zona 3, mientras que para las zonas 1 y 2, los valores cambiaron de forma significativa. Se observa gran sensibilidad del modelo a los valores de conductividad asignados en cada ensayo de prueba y error.

Las diferencias entre los valores de conductividad inicial y los calibrados pueden ser el resultado del desconocimiento de las profundidades reales del acuífero, sobre todo donde éste presenta profundidades mayores a los 500 m, dado que los estudios de prospección geofísica alcanzaron profundidades menores al valor indicado. Asimismo, una deficiente realización de las pruebas de bombeo, puede haber influido en los valores de la conductividad hidráulica y del coeficiente de almacenamiento del acuífero.

El Cuadro 6.2 muestra los valores de la conductividad hidráulica asignados a las tres zonas del modelo, en donde se obtuvo una calibración aceptable con los de la carga hidráulica histórica de 1988.

Cuadro 6.2
Valores de conductividad hidráulica asignados en m/s

ZONA	K (valor inicial)	K (valor calibrado)
1	7×10^{-5}	1×10^{-5}
2	1×10^{-4}	4.2×10^{-5}
3	8×10^{-4}	8×10^{-4}

La densidad de las pruebas de bombeo es otro de los factores que influyen en los valores de los parámetros hidráulicos estimados inicialmente, ya que sólo se tiene información en el área de pozos ubicados en la zona de La Yarada y Asentamientos, y en forma aislada en Magollo y Tacna.

6.1.3 Balance

Los resultados de la calibración fueron usados para el conocimiento del acuífero La Yarada, que permitió analizar la variación espacial de la napa freática y el balance hídrico del agua subterránea. El balance se realizó para las mismas condiciones en las que se dividió el acuífero para la asignación de la recarga.

Se puede observar que la componente de mayor valor es la debida a la explotación del acuífero con $165,743 \text{ m}^3/\text{d}$, seguido de la carga constante con $52,650 \text{ m}^3/\text{d}$, que representa la descarga del acuífero al Océano Pacífico.

Respecto al flujo de entrada al acuífero, la componente de mayor valor es la debida a la recarga por interconexión hidráulica del flujo subterráneo proveniente del río Caplina y las quebradas Viñani, Cauñani, Espíritus y Escritos con 122,050 m³/d, seguido de la alimentación indirecta proveniente de la infiltración del agua en el sistema de riego con 81,074 m³/d. Algo muy importante que resaltar en el balance es el flujo de entrada proveniente desde el Océano Pacífico (agua salada) hacia el acuífero (agua dulce) en una cantidad de 15,243 m³/d, lo que evidencia el fenómeno de la intrusión marina. El Visual MODFLOW permite mostrar en forma gráfica los resultados del balance del flujo subterráneo de cada uno de los componentes que la producen. En la Figura 6.1 se presenta, en grafico de barras, los componentes del modelo que producen entradas de flujo al acuífero (color azul) y las que producen salidas de flujo (color rojo).

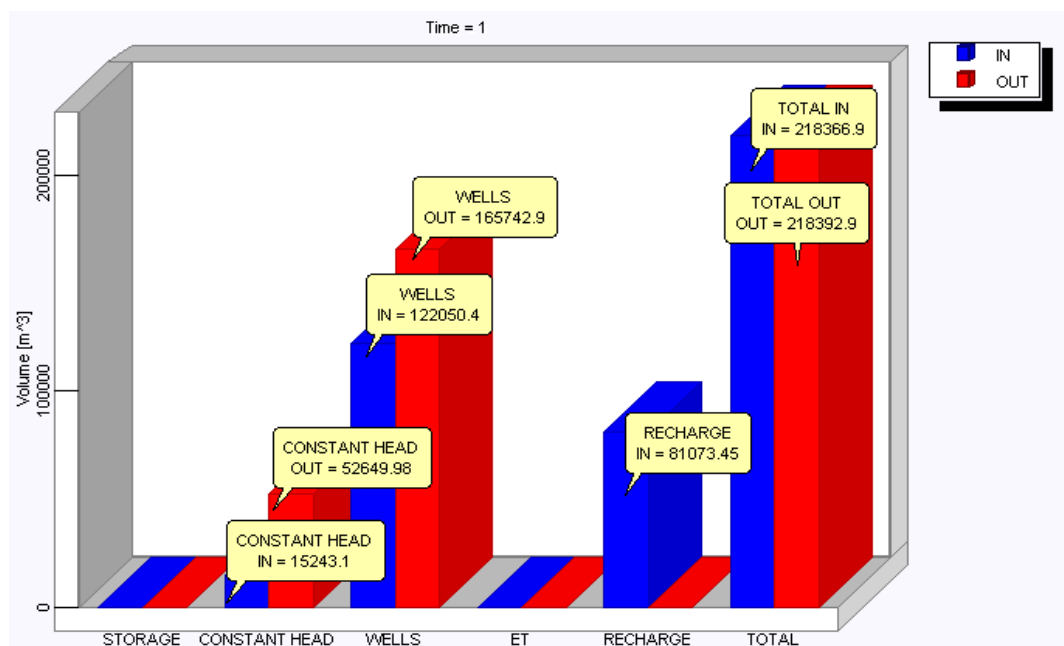


Figura 6.1 Balance de entradas y salidas de flujo en el acuífero

Del balance calculado para el modelo, se observa que el flujo total resultante en el acuífero para el período base de calibración (junio de 1988), es de 218,367 m³/d o el equivalente a una masa anual de 79,703,955 m³.

6.1.4 Líneas equipotenciales y dirección del flujo

La Figura 6.2 muestra la concordancia entre los niveles piezométricos observados en el acuífero y los obtenidos mediante simulación con el modelo.

El coeficiente de correlación es 0.978, mostrando un ajuste muy satisfactorio entre los niveles simulados y los observados. La desviación estándar o error medio cuadrático de la carga observada y la calculada es de 4.127 m, siendo el error normalizado de la raíz media cuadrática de los niveles NRMS = 0.06356 (6.356%), pudiendo observarse un mayor ajuste en el campo de pozos ubicados en la zona de La Yarada (zona de mayor interés de la investigación), y una mayor dispersión en la zona de Asentamientos, ubicada próxima a Tacna, y Santa Rosa cerca a la frontera con Chile.

Anderson y Woessner (1992) consideran que valores normalizados de la raíz media cuadrática (NRMS) de la carga observada y calculada menor al 10% son usualmente aceptados como una calibración razonable en un modelo regional.

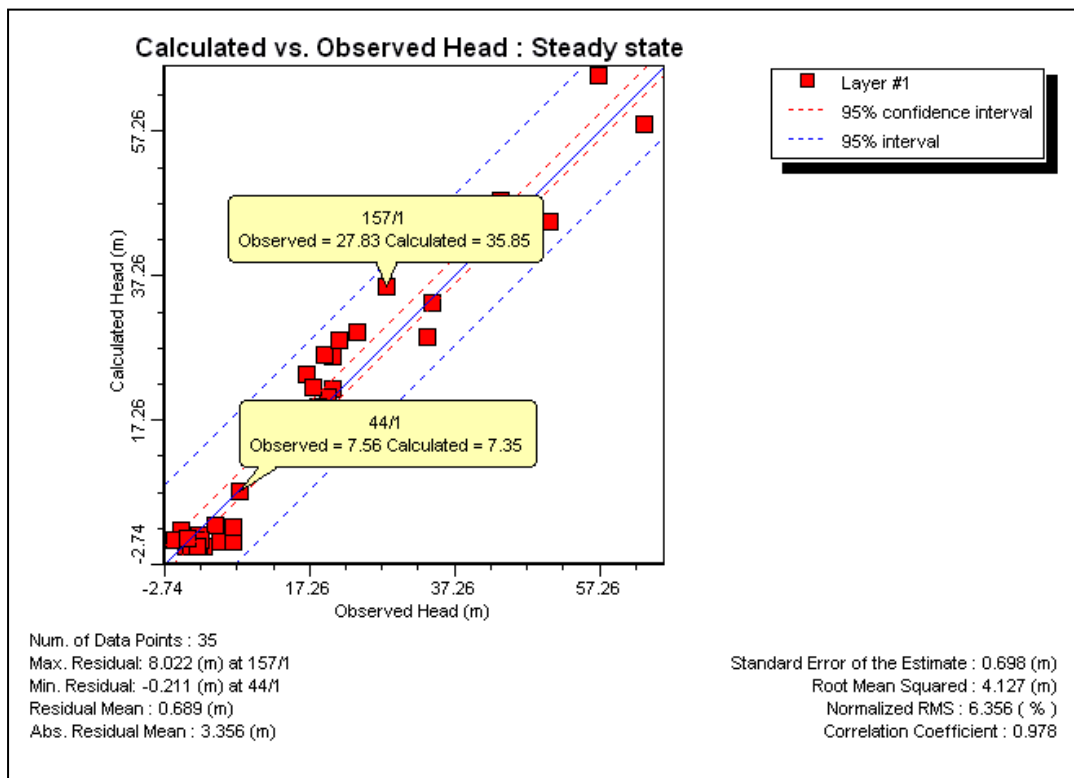


Figura 6.2 Ajuste de los niveles piezométricos observados y calculados

El pozo que presenta un mejor ajuste entre el nivel de agua observado con el calculado por el modelo, es el IRHS 44, con un error de -0.211 m; siendo el pozo IRHS 157, el que presenta un mayor error, 8.022 m, más que el observado.

A escala regional, se aprecia una mayor concentración de las líneas equipotenciales hacia el Noreste, alcanzando un valor máximo de 250 m en la zona límite del sector de Magollo. Hacia el sector de La Yarada, se observa en la Figura N° 6.3 que la curva equipotencial 0.00 se desplaza hacia el continente, hasta una distancia aproximada de 5.20 km desde la línea de playa, evidenciando el riesgo de la intrusión marina en el acuífero.

Por otro lado, la dirección predominante del flujo es de Noreste a Suroeste en casi toda el área, a excepción de la zona de Santa Rosa, en donde se desplazaría hacia el Sur, en dirección al Océano Pacífico; no siendo posible establecer una dirección preferencial debido a la falta de información disponible para esa área, tal como se aprecia en la Figura 6.3.

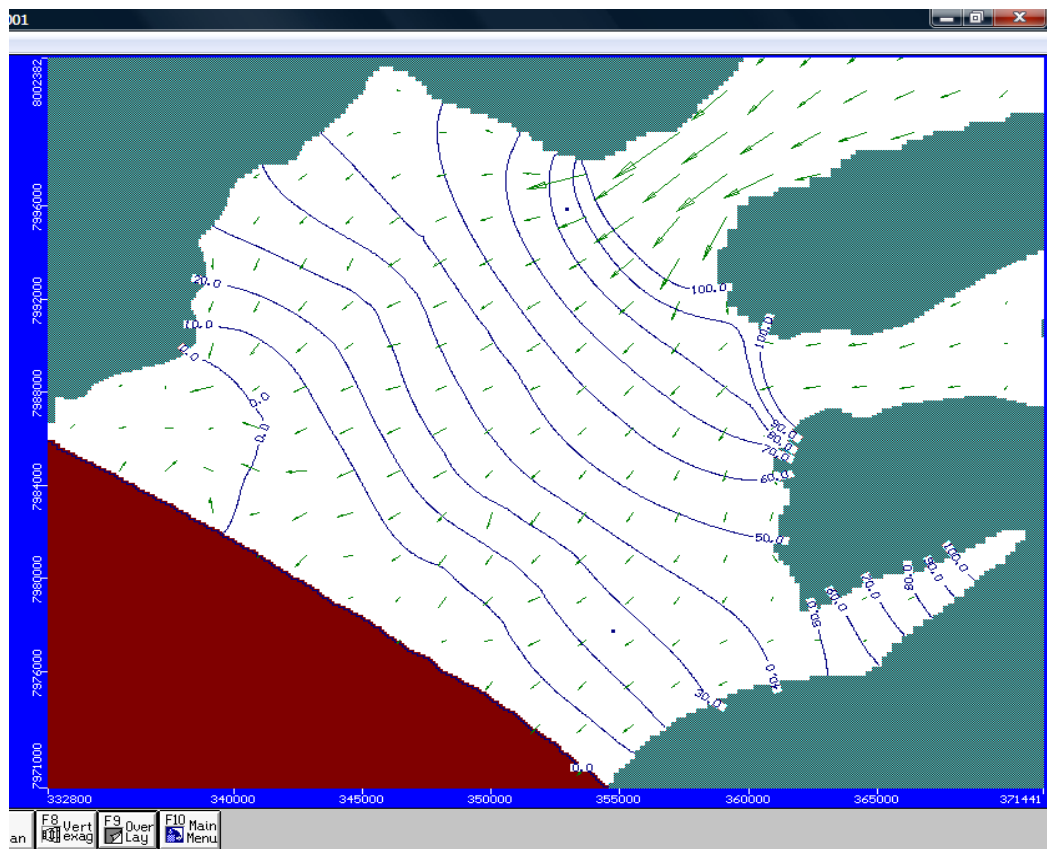
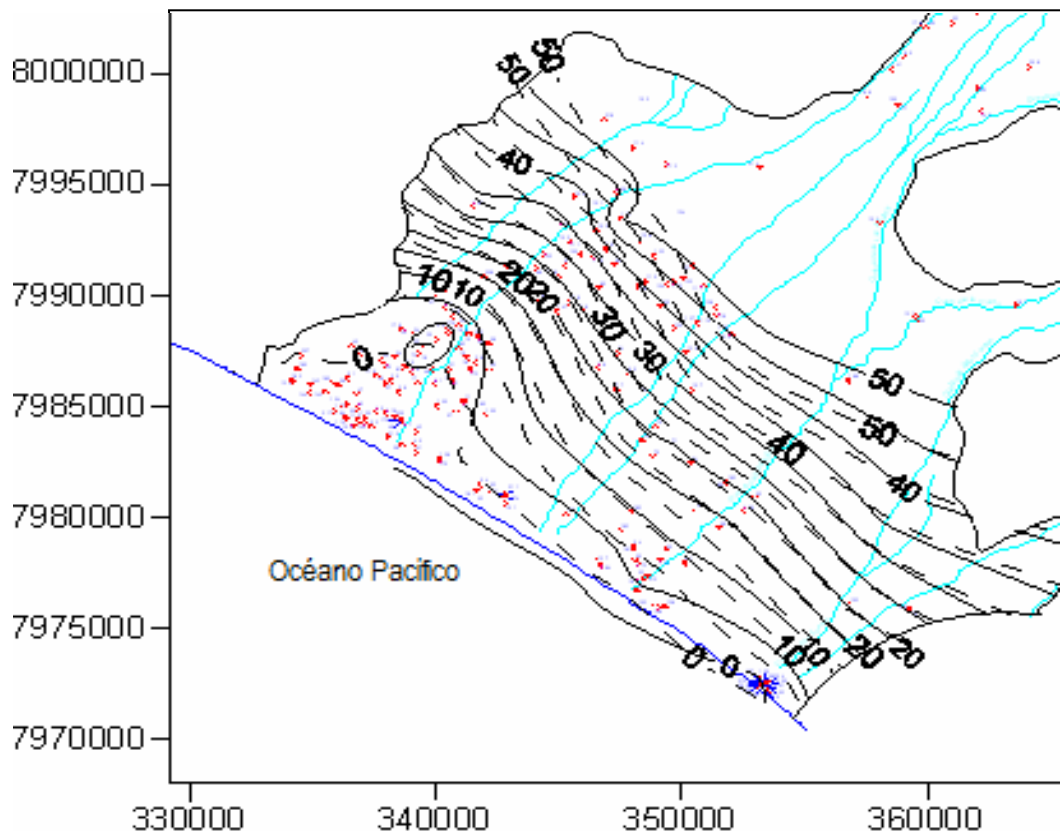


Figura 6.3 Líneas equipotenciales y dirección del flujo en el modelo acuífero La Yarada

Se observa también que la velocidad del flujo subterráneo se incrementa entre el sector de Asentamientos y Magollo, específicamente en donde el acuífero presenta una estrechez final para luego dar inicio al delta del río Caplina,

confirmándose los estudios de la geoforma del acuífero, al indicar que a partir de la garganta de Magollo, el acuífero se ensancha y profundiza hasta llegar a la zona del litoral.

La Figura 6.4 muestra la comparación entre las líneas equipotenciales medidas en los pozos de observación y las estimadas por el modelo, obtenidos mediante interpolación por Kriging del Surfer; donde se puede observar un grado de concordancia muy satisfactorio hasta la cota piezométrica de 50.00 m.s.n.m.; para mayores valores de la cota piezométrica, no hay un buen ajuste entre los valores observados y los valores calculados, por lo que se descarta un mayor análisis. La situación que se presenta es lógica y coherente, por cuanto la mayor información disponible de datos del acuífero (niveles de agua, pozos de observación, piezómetros, aforos) está concentrada en la zona de La Yarada, y en forma muy dispersa o nula en otros sectores.



(——) Observado, (- - - - -) Calculado

Figura 6.4 Comparación entre las líneas equipotenciales observadas y calculadas en el modelo.

- **Campo de pozos del Litoral y La Yarada Baja**

Al realizar un análisis detallado de esta zona, que es la más crítica del acuífero, se aprecia una deformación de las líneas equipotenciales, cóncavas alrededor del campo de pozos producido por la sobre explotación y la influencia de la intrusión marina en el acuífero. La dirección del flujo es preferencial desde el litoral hacia el continente con una entrada de agua de mar de 15,243 m³/d. En la Figura 6.5 se observan los pozos IRHS 35, 37 y 206, con influencia de la intrusión marina.

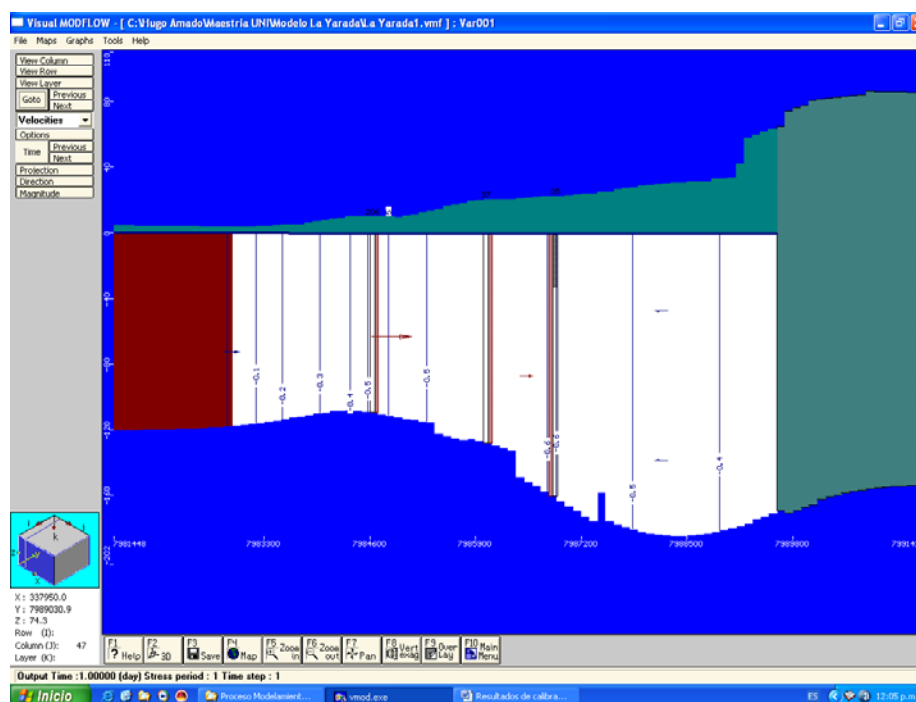


Figura 6.5 Pozos IRHS 35, 37 y 206, con influencia de la intrusión marina. Cota piezométrica -0.50 m.s.n.m. (Sección transversal en columna 47 del modelo)

- **Campo de pozos del sector Asentamientos**

En esta zona se observa la presencia de flujo de agua proveniente de las zonas adyacentes, así como una menor densidad de líneas equipotenciales en las inmediaciones de los pozos, claro indicativo de una menor explotación a que está sometido el acuífero. También, se aprecia la influencia del flujo subterráneo del río Caplina, hecho que se confirma cuando las curvas equipotenciales se muestran perpendiculares al curso del río. La Figura 6.6,

muestra una sección transversal del acuífero en la fila 311 del modelo, donde se observa que el pozo IRHS 63 no es afectado por el fenómeno de la intrusión marina.

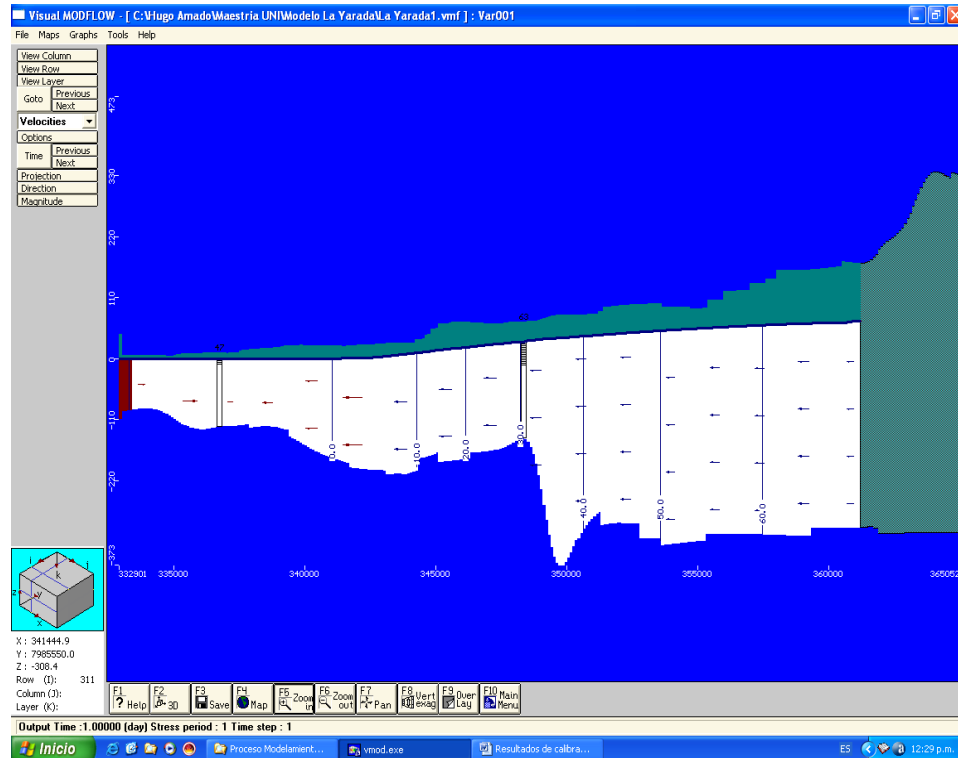


Figura 6.6 Pozo IRHS 47, afectado por intrusión marina y pozo IRHS 63, no afectado. (Sección transversal en fila 311 del modelo)

- **Campo de pozos de sector Los Palos y Santa Rosa**

Para esta zona se tiene curvas equipotenciales mucho más distanciadas, que sólo aumentan en número en las inmediaciones de los pozos ubicados en este sector. La dirección preferencial del flujo es hacia el Sur, y se dirige hacia la carga constante del Océano Pacífico. Se observa al Norte la influencia de la interconexión hidráulica de la quebrada Cauñani y Espíritus que cambia la dirección predominante del flujo subterráneo hacia el Sur

6.2 Resultados de la simulación de hipótesis

Con el fin de analizar los resultados de la simulación, se han superpuesto las curvas piezométricas del agua subterránea del estado inicial, correspondiente

a junio de 1988 (Cuadro 4.3 y Figura 5.10), con los niveles piezométricos del agua subterránea obtenidos de cada hipótesis planteada.

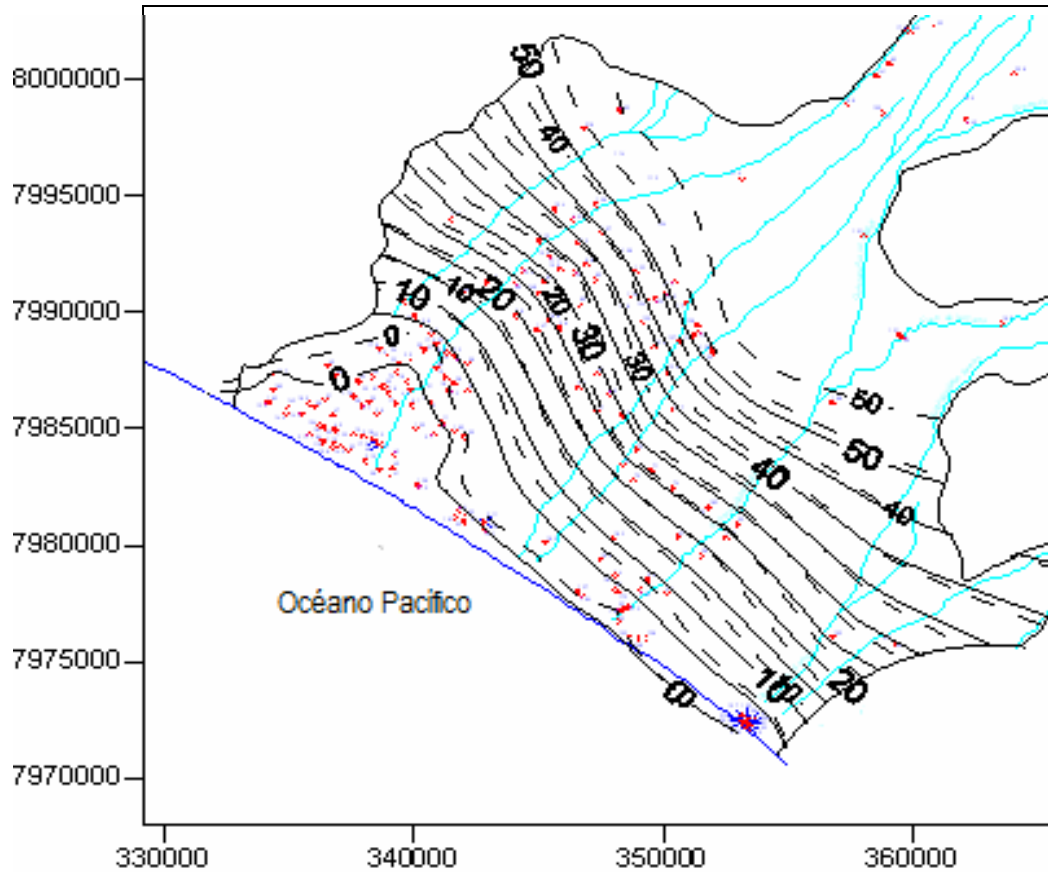
En esta etapa, también, se analizó el riesgo de intrusión marina que presentaría el acuífero debido a la sobreexplotación, para ello se determinaron las profundidades de la interfase de la cuña marina, dada por la condición teórica de Ghyben-Herzberg, para cada hipótesis de simulación.

1) Primera hipótesis

De acuerdo a los resultados mostrados en el Anexo 4 y la Figura 6.7, en el sector de Los Asentamientos, se forma un cono de depresión, descendiendo el nivel máximo de agua hasta 15.25 m (pozo de observación IRHS 107), respecto al estado inicial del acuífero y de 5.5 m, en promedio en La Yarada, de igual modo el nivel freático desciende entre 2 y 4.5 m, en la zona de Los Palos. Asimismo, se aprecia un flujo de agua de mar hacia el acuífero en las zonas de Litoral y La Yarada, estimado en 37,642 m³/d, según el modelo (Figura 6.8). El caudal de explotación simulado del acuífero de 3,358 l/s es superior a la reserva reguladora de 1.297 l/s, por lo que es evidente la sobreexplotación del acuífero.

La interfase de la cuña marina en el sector del Litoral y La Yarada se encuentra localizada a una profundidad entre 8.80 y 56.40 m de profundidad (Anexo 4), lo que haría evidente que las aguas explotadas en este sector estarían contaminadas por el agua de mar, siendo el pozo IRHS 164, por estar más cercano a la línea de playa (3 km) el más contaminado. En el sector de Los Asentamientos, la interfase se encontraría a 482 m de profundidad, por lo que los pozos de este sector no presentarían contaminación, debido a que la profundidad máxima de perforación es de 127 m (IRHS 155).

El pozo IRHS 192, del sector Los Palos (1.4 km de la playa), también presentaría contaminación por encontrarse la interfase marina a 7.60 m de profundidad de la superficie del terreno.



(——) Observado, (- - - - -) Calculado

Figura 6.7 Comparación entre las líneas equipotenciales de calibración y simuladas, según hipótesis 1.

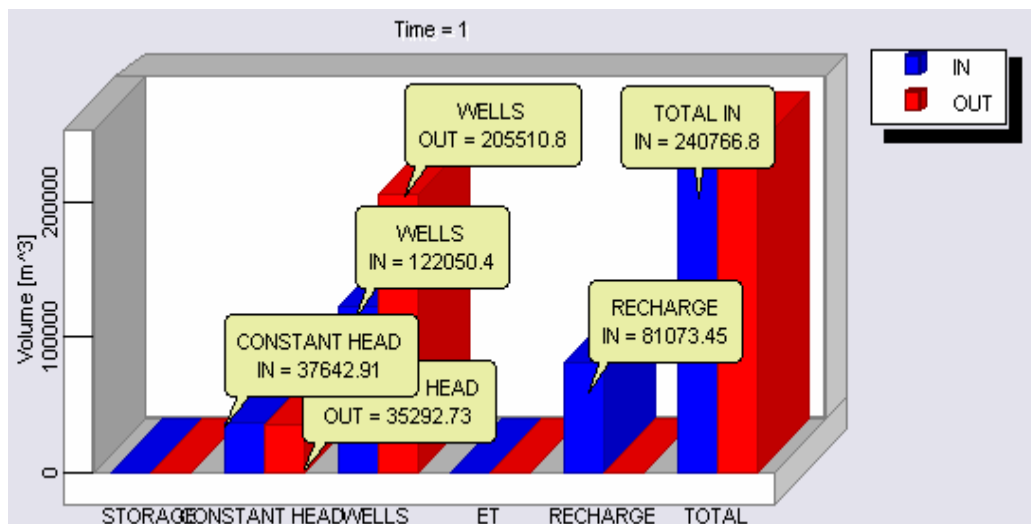
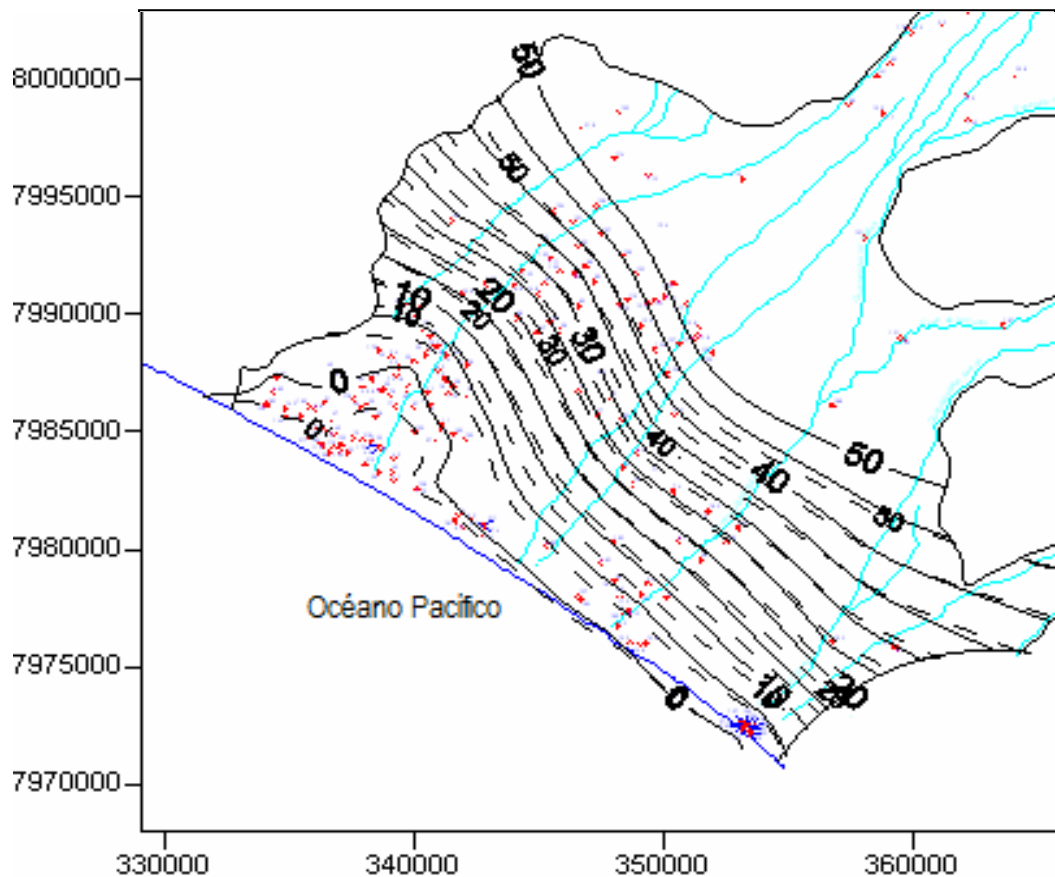


Figura 6.8 Balance de entrada y salida de flujo en el acuífero, según hipótesis 1

2) Segunda hipótesis

Para esta hipótesis, los niveles ascienden entre 2 y 4 m, en la zona de La Yarada; en la zona de Asentamientos, el nivel se incrementó entre 7 y 8.5 m y en el sector Los Palos, se observa que el nivel freático ha ascendido 1.5 m, respecto al estado inicial. Tal como se observa en la Figura 6.9 el nivel piezométrico 0.00 m.s.n.m. se aproxima a la línea de playa, estimándose una distancia máxima de 2.60 km hasta el litoral. Es notorio que la intrusión marina en el acuífero disminuye considerablemente; observándose en el modelo un flujo de agua de mar de $12.67 \text{ m}^3/\text{d}$ hacia el continente (Figura 6.10), por lo que podría considerarse el caudal de simulación de la hipótesis 2 como la explotación de equilibrio en el acuífero, por el cual el riesgo de intrusión marina es mínimo.



(——) Observado, (- - - - -) Calculado

Figura 6.9 Comparación entre las líneas equipotenciales calibradas y simuladas, según hipótesis 2.

La profundidad de la interfase marina está comprendida entre 11.60 y 123.20 m, en el sector del Litoral y La Yarada, por lo que podrían estar contaminados con agua de mar los pozos del litoral cuya profundidad de perforación sea mayor a 11.60 m (IRHS 135, 136, 164). El sector de Los Asentamientos no está influenciado por la interfase marina dado que las profundidades promedio de los pozos son de 48 m. En los sectores de Santa Rosa y Los Palos no se evidencia el riesgo de la intrusión marina en el acuífero.

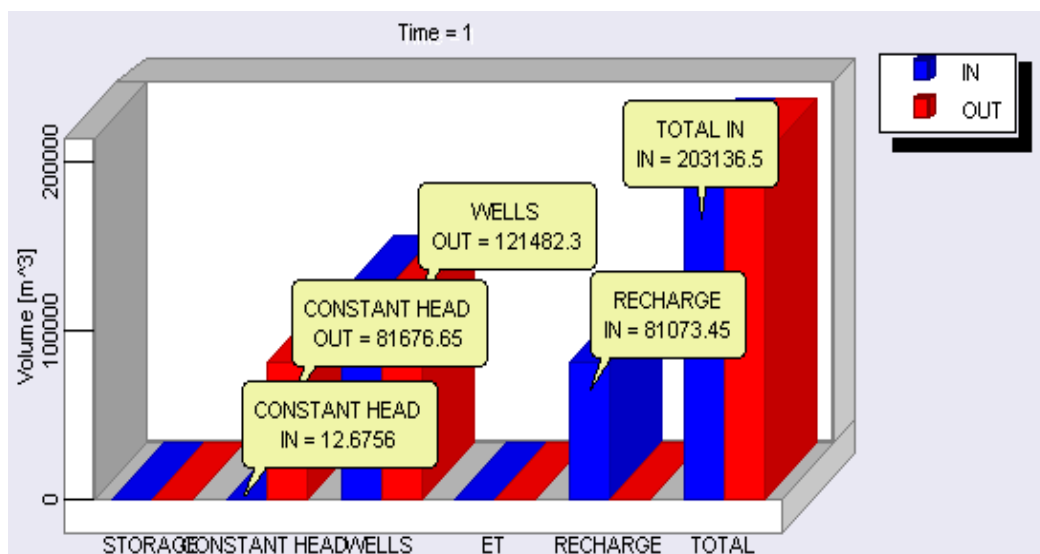


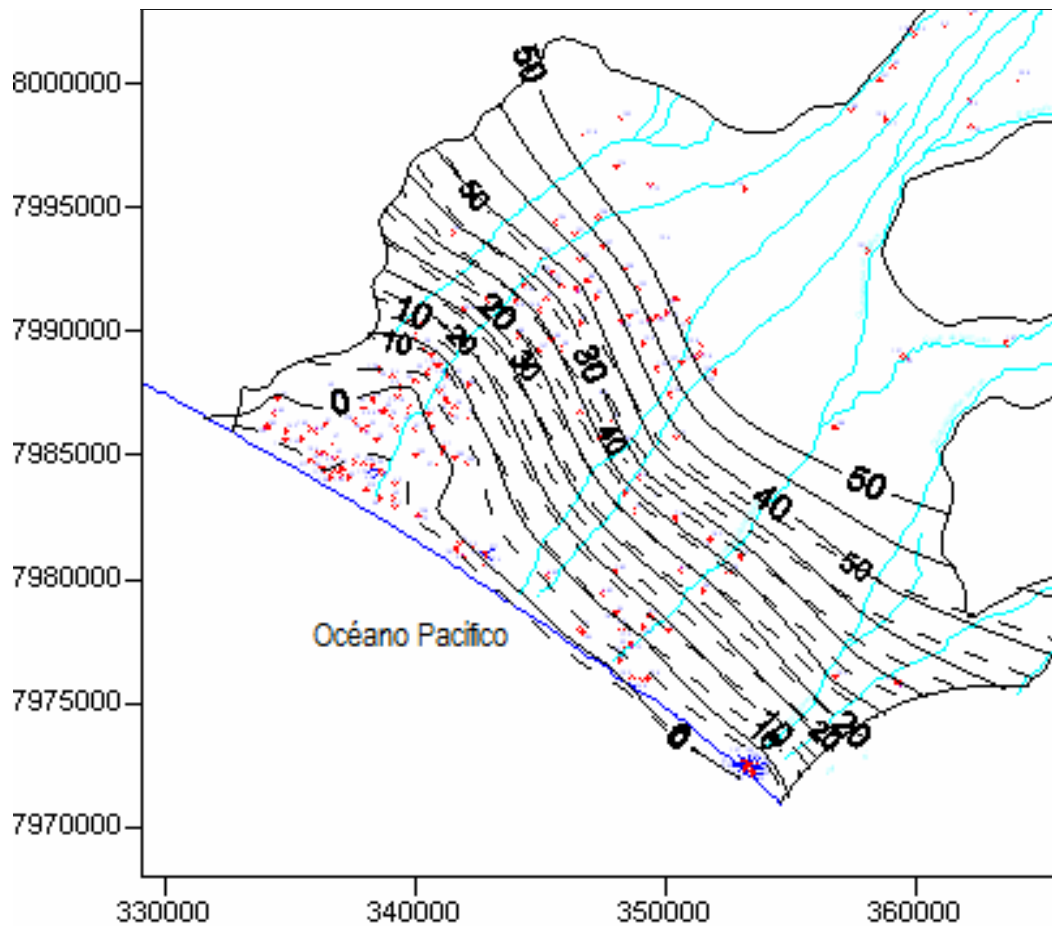
Figura 6.10 Balance de entrada y salida de flujo en el acuífero, según hipótesis 2

3) Tercera hipótesis

Con el régimen de explotación del acuífero de 1,379 l/s, superior sólo en 82 l/s a la reserva reguladora de 1.297 l/s, se pretende recuperar la reserva total del acuífero y evitar su agotamiento futuro. Los niveles de la napa freática ascienden entre 3 y 5.5 m, respecto al estado inicial de simulación en el sector de La Yarada, considerado la zona crítica de explotación del acuífero (Figura 6.11).

Respecto a la intrusión marina, se observa que la curva piezométrica de nivel 0.00 m.s.n.m., se desplaza muy próxima a la línea de playa, no

presentándose flujo de agua de mar hacia el acuífero (Figura 6.12). Los pozos del sector del Litoral y La Yarada, muy cerca de la línea de playa (menores a 1.8 km) presentarían peligro de salinización, puesto que la profundidad de la interfase se localiza entre 21.20 y 204 m de profundidad (Anexo 4). Esta hipótesis se presenta como una alternativa aceptable para el control de la intrusión marina y la preservación del recurso hídrico. Con esta hipótesis de explotación y para caudales menores a 1,379 l/s, los sectores de Santa Rosa, Los Asentamientos y Los Palos no presentan ningún riesgo de intrusión marina.



(———) Calibrado, (- - - -) Simulado

Figura 6.11 Comparación entre las líneas equipotenciales calibradas y simuladas, según hipótesis 3.

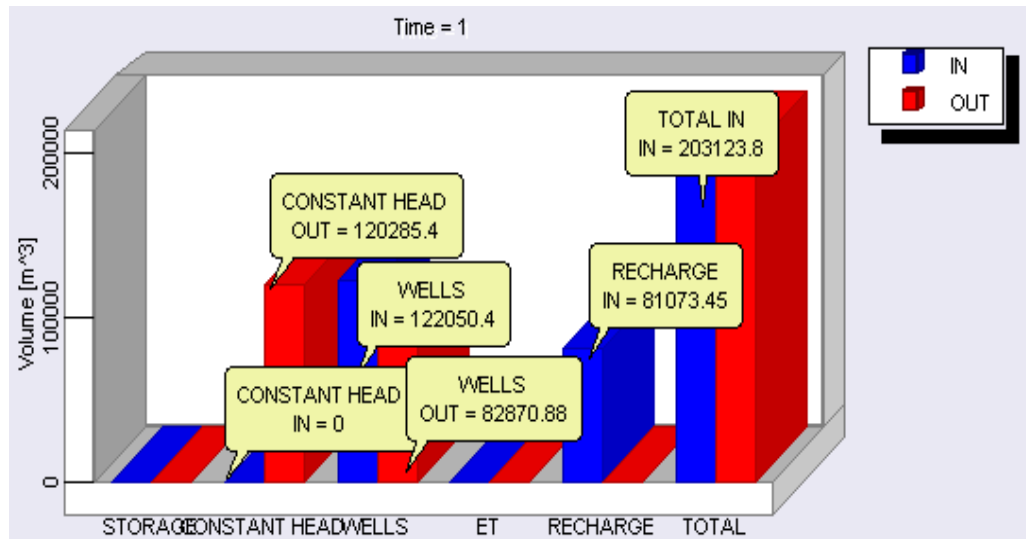


Figura 6.12 Balance de entrada y salida de flujo en el acuífero, según hipótesis 3

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo de investigación ha permitido llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Conclusiones

1. En la etapa de calibración del modelo, se logra reproducir el comportamiento del acuífero para el periodo histórico de Junio de 1988, donde se dispone de los registros e inventario de pozos; obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.978 y un error normalizado NRMS de 0.06356 (6.356%), pudiendo observarse un mayor ajuste en el campo de pozos ubicados en la zona de La Yarada (zona de mayor interés de la investigación), y una mayor dispersión en la zona de los Asentamientos, ubicado próximo a Tacna, y sector Los palos y Santa Rosa, cerca a la frontera con Chile.
2. La profundidad de la napa se incrementa a medida que se aleja de la línea de playa, registrándose las mayores profundidades al Noreste del cono aluvial, sector de Los Asentamientos (pozos IRHS 131 y 151) del orden de los 115 m; a partir de este sector la profundidad de la napa disminuye hasta 40 m en la zona de la garganta de Magollo. Aguas arriba del valle del Caplina, la profundidad de la napa aumenta en forma equitativa registrándose valores entre 70 y 80 m, en la ciudad de Tacna.
3. El análisis de las curvas hidroisohipsas permitió observar que la dirección principal del escurrimiento de las aguas subterráneas en la mayor parte del valle es de Noreste a Suroeste drenando hacia el océano Pacífico, a excepción de la zona de Santa Rosa, en la frontera con Chile, en donde se desplazaría hacia el Sur, en dirección al Océano Pacífico, no siendo posible establecer una dirección preferencial debido a la falta de información para esa área. Se observa que la curva equipotencial 0.00 se desplaza hacia el

continente, hasta una distancia aproximada de 5.20 km desde la línea de playa, evidenciando el riesgo de la intrusión marina en el acuífero.

4. Dada la proximidad entre los pozos en el sector de La Yarada (IRHS-14 e IRHS-31), y otros en el centro del valle (pozos IRHS-94 e IRHS-166), se presentaría interferencia, si el tiempo de bombeo es de 24 horas; si se tiene en cuenta que el radio de influencia es mayor que la distancia entre ellos (240 m y 353 m, respectivamente). En similar condición estarían los pozos IRHS-01 e IRHS-03 en el sector del litoral, pues el radio de influencia es mayor a su distancia (230 m).
5. La primera hipótesis, con caudal de explotación de 3,358 l/s (205,510 m³/d) muestra que en el sector Asentamientos, se forma un cono de depresión, con descensos del nivel freático hasta 15.25 m (pozo de observación IRHS 107), respecto al estado inicial del acuífero. Asimismo, se aprecia un flujo de agua de mar hacia el acuífero en las zonas del Litoral y La Yarada, estimado en 37,642 m³/d. El caudal de explotación simulado del acuífero de 3,358 l/s es superior a la reserva reguladora de 1.297 l/s, por lo que es evidente la sobreexplotación del acuífero.
6. La segunda hipótesis, con caudal de explotación de 1,985 l/s (121,482 m³/d) muestra que los niveles freáticos ascendieron entre 2 y 4 m, en la zona de La Yarada; en la zona de Asentamientos, el nivel se ascendió entre 7 y 8.5 m, y en el sector Los Palos, el nivel freático ascendió 1.5 m, respecto al estado inicial. El nivel piezométrico 0.00 se aproxima a la línea de playa, estimándose una distancia máxima de 2.60 km hasta el litoral. Este caudal de explotación podría considerarse como el de equilibrio del acuífero, con un riesgo mínimo de intrusión marina.
7. La tercera hipótesis, con régimen de explotación del acuífero de 1,379 l/s, muestra que la intrusión del agua salada al acuífero es nula, concluyéndose que con caudales inferiores se lograría preservar la reserva total del acuífero y evitar su agotamiento futuro. Los niveles de la napa freática ascienden entre 3 y 5.5 m, respecto al estado inicial de simulación en el sector de La Yarada, considerado la zona crítica de explotación del acuífero.

8. Se concluye que la interfase de la cuña marina en el sector del Litoral y La Yarada, para la primera hipótesis se encuentra localizada entre 8.80 y 56.40 m de profundidad; entre 11.60 y 123.20 m, para la segunda hipótesis y entre 21.20 y 204 m de profundidad, para la tercera hipótesis de explotación; presentando para la última consideración el riesgo de contaminación por agua de mar, sólo los pozos del sector del Litoral y La Yarada, localizados muy próximos a la línea de playa (menores a 1.8 km).

Recomendaciones

1. Profundizar los estudios hidrológicos, hidrogeológicos y de prospección geofísica en el acuífero de La Yarada, lo que permitirá estimar con mejor aproximación la reserva total del agua subterránea y un mayor conocimiento de la variación espacial y temporal del mismo.
2. Realizar similares estudios en otros acuíferos costeros que presenten riesgo de intrusión marina, permitiendo en forma anticipada tomar las medidas de prevención para la conservación del recurso hídrico subterráneo.
3. Implementar una red de medición piezométrica lo más densa posible y efectuar el monitoreo en forma mensual para evaluar la dinámica del acuífero y su evolución temporal bajo efectos de explotación del agua subterránea o debido a cambios naturales.
4. Efectuar la simulación del flujo de agua subterránea en un estado transitorio empleando el modelo que se planteo en la investigación, por cuanto reflejaría las condiciones reales y las acciones externas en el sistema acuífero.
5. Incrementar el uso de sistemas presurizados para el riego agrícola, minimizando las pérdidas de agua y logrando irrigar una misma área con un caudal de agua menor al que se obtendría de un riego por gravedad.
6. Finalmente, se recomienda la implementación en Tacna de otras fuentes de abastecimiento de agua, sea para uso poblacional o agrícola; restringiendo por un periodo de tiempo la explotación del agua subterránea en el sector de La Yarada, hasta lograr la recuperación del acuífero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Amisial R. y Jegat H. 1976. Aprovechamiento y modelos de aguas subterráneas. CIDIAT. Mérida. Venezuela.
2. Anderson, M. y Woessner, W. 1992. Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic Press, Inc. California, USA.
3. ASCOSES, 1980. Estudio hidrogeológico de La Yarada. Corporación de Desarrollo de Tacna. Perú.
4. Bear J. y Verruijt A. 1987. Modelling groundwater flow and pollution. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holanda.
5. Bibby, R. 1971. Statistical error analysis of groundwater systems. Tesis Ph. D., Colorado State University, USA
6. Boonstra, J. y Ridder, N. A. 1981. Numerical modelling of groundwater basins. ILRI. The Netherlands.
7. Castany, G. 1978. Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
8. Cleary, Robert W. 1991. Modelagem matematica em agua subterranea. Colección ABRH. De Recursos Hídricos. Asociación Brasileira de Recursos Hídricos. Editora USP. Sao Paulo, Brasil.
9. Custodio, E. y Llamas, M. 1996. Hidrología subterránea. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
10. FAO. 1981. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Contaminación del agua subterránea. Manual 31. Roma. Italia.
11. Fetter, C. W. 2001. Applied hydrogeology. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, USA.
12. Franz, T. y Guiguer, N. 1992. Flowpath. Two dimensional horizontal aquifer simulation model. Waterloo Hydrogeologic Software. Canadá.
13. García J, Heredia J, Murillo J, González A. contribución desde la modelización del flujo subterráneo al conocimiento del acuífero del río Verde (Granada). Instituto geológico y minero de España.

14. Iglesias, W., Vásquez, F. y Turkowsky, R. 1989. Simulación numérica de la napa freática del Valle Virú con fines de drenaje. FAO. Santiago. Chile.
15. Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). 1988. Estudio de factibilidad del proyecto de propósitos múltiples Vilavilani II. Lima, Perú.
16. Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). 1996. Estudio hidrogeológico de las Pampas de La Yarada y Hospicio de Tacna. Lima, Perú.
17. Kinzelbach, Wolfgang, 1986. Groundwater Modelling, cap. 3. Elsevier Science Publishers B. Amsterdam, The Netherlands.
18. McDonald, M. G., Harbaugh, A. W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey. *Techniques of Water-Resources Investigations*, 6, variously paginated, USA.
19. McWhorter, D. y Sunada, D. 1977. Ground- water hydrology and hydraulics. Water Resources Publications, USA.
20. Neuman S. P., Witherspoon, P. A. 1970. Finite element method of analyzing steady seepage with a free surface. Water Resources Research, USA
21. Prickett, T. A. y Lonquist, C.G. 1971. Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. Illinois State Water simulation Survey, Report of Investigation, 55, 62 p. USA.
22. Tood, D. K. 1959. Groundwater hydrology. John Wiley and Sons, New York. USA.
23. Van der Vorst H.1992. A fast and smoothly converging variant of BiCG for the solution of non-symmetric linear systems, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, Vol. 13, Amsterdam, The Netherlands.
24. Verruijt A. 1970. Theory of groundwater flow. Macmillan and Co Ltd. London. Great Britain.
25. Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2001. *User's manual for Visual MODFLOW: 3-D, Groundwater Flow and Transport Modeling*. Waterloo, Ontario. Canadá.
26. Zienkiewicz O. C. y Cheung. 1966. The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, London. Great Britain.

Usted puede acceder a los anexos consultando el formato físico de la tesis.