



MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLOGICO DEL ÁREA PILOTO RIVERA-SANTANA

Sistema Acuífero Guaraní

Contrato No. LPI/03/05

**Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica,
Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología Localizada de las
Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní**

Preparado por

**David Charlesworth
Azita Assadi
Henri Sangam**



**SNC•LAVALIN
International**

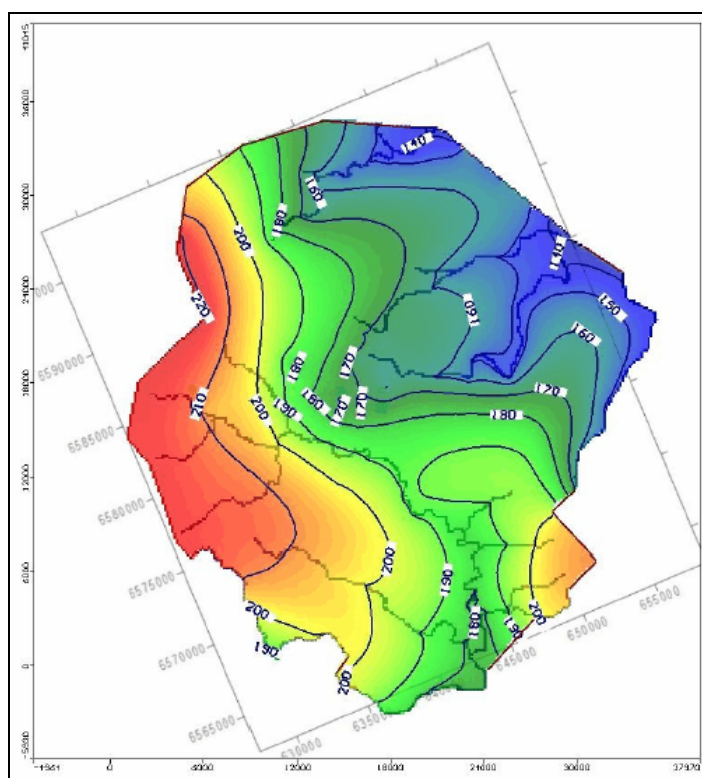
Mayo, 2008



Contrato No. LPI/03/05

**Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica,
Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología Localizada de las
Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní**

**Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo
Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní**



Modelo Numérico Hidrogeológico de Rivera-Santana do Livramento

**MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLOGICO DEL ÁREA PILOTO
RIVERA-SANTANA**



**SNC•LAVALIN
International**



Equipo del Proyecto

Responsables Nacionales:

Por Argentina
Por Brasil
Por Paraguay
Por Uruguay

Fabián López
João Bosco Senra
Carlos López Dose
Víctor Rossi

Coordinadores Nacionales:

Argentina

Miguel Ángel Giraut
María Josefa Fioritti (Co-coordinadora)
María Santi (Co-coordinadora)
João Bosco Senra
Elena Benítez
Lourdes Batista

Brasil
Paraguay
Uruguay

Representantes OEA:

Jorge Rucks
Carlos Sténeri

Representantes Banco Mundial:

Abel Mejía
Douglas Olson
Samuel Taffesse
Karin Kemper

Secretaría General:

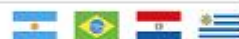
Secretario General
Coordinador Técnico
Coordinador Técnico
Coordinador de Comunicación
Asistente técnico
Auxiliar técnico
Administración
Auxiliar Administrativa
Secretaria Bilingüe

Luiz Amore
Jorge Santa Cruz
Daniel García Segredo
Roberto Montes
Alberto Manganelli
Santiago Ferrero
Luis Reolón
Alejandra Griotti
Mariángel Valdés

Facilitadores proyectos piloto:

Concordia – Salto
Rivera – Santana
Itapúa
Ribeirão Preto

Enrique Massa Segui
Achylls Bassedas
Alicia Eisenkölbl
Mauricio Santos



Lista de Distribución:

| SNC-LAVALIN INTERNATIONAL | | |
|--|---------------------------------|-----|
| Steve Lindley | Gerente del Proyecto | (1) |
| Adriana Lafleur | Director Técnico del proyecto | (1) |
| Sandra Roldán | Archivo y Control del Proyecto | (2) |
| Doug Hodgins | Director Corporativo | (1) |
| Sam Khattab | Director de Calidad Corporativo | (1) |
| ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS, OEA | | |
| Luiz Amore | Secretario General | (1) |
| Jorge Santa Cruz | Gerente de Servicios | (1) |
| EMPRESAS ASOCIADAS | | |
| Valter Galdiano | DH | (1) |
| Mario Nascimento Souza | DH | (1) |
| Hector Gabriel Santarelli | PROINSA | (1) |
| Daniel Boggetti | P y T | (1) |
| Maria Luisa Rodríguez | LCV | (1) |
| Gerardo Rezoagli | GEODATOS | (1) |



TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1.0 | INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 1.1 | ANTECEDENTES..... | 13 |
| 1.2 | EL MODELO CONCEPTUAL | 15 |
| 1.3 | EL MODELO INFORMÁTICO | 16 |
| 1.3.1 | <i>El código de modelación.....</i> | <i>16</i> |
| 1.3.2 | <i>La cuadrícula del Modelo.....</i> | <i>17</i> |
| 1.3.3 | <i>Parámetros del Modelo.....</i> | <i>18</i> |
| 1.3.4 | <i>Condiciones de borde.....</i> | <i>18</i> |
| 2.0 | EL MODELO CONCEPTUAL DE RIVERA- LIVRAMENTO | 20 |
| 2.1 | DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL | 20 |
| 2.2 | EL MARCO GEOLÓGICO | 20 |
| 2.3 | EL MARCO HIDROGEOLÓGICO | 22 |
| 2.3.1 | <i>Principales unidades hidroestratigráficas</i> | <i>22</i> |
| 2.3.2 | <i>Los componentes del Acuífero Guaraní</i> | <i>22</i> |
| 2.3.3 | <i>El sistema de flujo de agua subterránea</i> | <i>23</i> |
| 2.4 | PROPIEDADES HIDRÁULICAS..... | 28 |
| 2.5 | RECARGA..... | 36 |
| 3.0 | EL MODELO NUMÉRICO..... | 38 |
| 3.1 | DOMINIO DEL MODELO | 38 |
| 3.2 | LA CUADRÍCULA DEL MODELO..... | 40 |
| 3.3 | LAS CAPAS DEL MODELO | 42 |
| 3.4 | CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA..... | 47 |
| 3.5 | NIVELES DE AGUA Y CARGAS HIDRÁULICAS | 48 |
| 3.6 | CONDICIONES DE BORDE..... | 48 |
| 3.7 | RÍOS | 48 |
| 3.8 | EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA..... | 50 |
| 3.9 | COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO | 50 |
| 4.0 | CALIBRACIÓN DEL MODELO | 53 |
| 4.1 | MODELACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE | 53 |
| 4.2 | RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN..... | 58 |
| 4.3 | MODELACIÓN EN RÉGIMEN TRANSITORIO..... | 62 |
| 5.0 | MODELACIÓN PREDICTIVA | 64 |
| 5.1 | OBJETIVOS..... | 64 |
| 5.2 | ESCENARIO 1 | 64 |
| 5.3 | ESCENARIO 2 | 64 |
| 5.4 | ESCENARIO 3 | 65 |
| 5.5 | IMPACTOS DE LOS ESCENARIOS DE EXPLOTACIÓN..... | 65 |
| 6.0 | CONCLUSIONES..... | 72 |
| 6.1 | LIMITACIONES DEL MODELO NUMÉRICO | 72 |
| 6.2 | RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO | 73 |
| 7.0 | RECOMENDACIONES | 74 |



LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----------|
| TABLA 1 – ÁREA PILOTO RIVERA SANTANA – RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS HIDRÁULICOS | 29 |
| TABLA 2 – VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA CALCULADOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS HIDRÁULICOS | 31 |
| TABLA 3 - VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SEGÚN GÓMEZ (2007)..... | 32 |
| TABLA 4 – VALORES DE TRANSMISIVIDAD Y ALMACENAMIENTO CITADOS POR GÓMEZ, 2008 | 33 |
| TABLA 5 – RANGO DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA BASADOS EN ESTUDIOS PREVIOS. | 33 |
| TABLA 6 – VALORES DE TRANSMISIVIDAD SEGÚN OLEAGA Y DE LOS SANTOS | 34 |
| TABLA 7 – PARÁMETROS DEL ACUÍFERO SEGÚN DIFERENTES AUTORES..... | 35 |
| TABLA 8 – RESUMEN DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA POR UNIDAD | 35 |
| TABLA 9 – UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS | 47 |
| TABLA 10 – CAUDALES DE BOMBEO DE LOS POZOS | 50 |
| TABLA 11 – COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE AGUA OBSERVADOS Y CALCULADOS | 54 |
| TABLA 12 – BALANCE HIDROLÓGICO EN ESTADO PERMANENTE – RIVERA SANTANA | 62 |
| TABLA 13 - RESULTADOS SIMULADOS VS. OBSERVADOS PARA EL ENSAYO HIDRÁULICO EN EL | 63 |
| TABLA 14 - RESULTADOS SIMULADOS VS. OBSERVADOS PARA EL ENSAYO HIDRÁULICO EN | 63 |
| TABLA 15 - RESULTADOS SIMULADOS VERSUS OBSERVADOS PARA EL ENSAYO HIDRÁULICO EN LA CENTRAL ELÉCTRICA/ POZO 10-4-037 | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| FIGURA 1 – EXTENSIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ Y UBICACIÓN DE LAS ÁREAS PILOTO..... | 14 |
| FIGURA 2 – SECCIÓN TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA – MODELO SUB-REGIONAL..... | 25 |
| FIGURA 3 - CURVAS PIEZOMÉTRICAS DEL ACUÍFERO GUARANÍ EN EL NORTE DE URUGUAY | 26 |
| FIGURA 4 – MAPA DE CURVAS PIEZOMÉTRICAS DEL ÁREA PILOTO RIVERA-SANTANA DO LIVRAMENTO | 27 |
| FIGURA 5 - DOMINIO DEL MODELO | 39 |
| FIGURA 6 - CUADRÍCULA DEL MODELO EN RÉGIMEN PERMANENTE | 41 |
| FIGURA 7 - SUPERFICIES INICIALES DEL MODELO..... | 43 |
| FIGURA 8 – UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS DEL MODELO | 45 |
| FIGURA 9 - SECCIÓN TRANSVERSAL QUE MUESTRA LAS CAPAS HIDROESTRATIGRÁFICAS DEL MODELO PÉRMICO | 46 |
| FIGURA 10 - CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO | 49 |
| FIGURA 11 - UBICACIÓN DE POZOS DE BOMBEO | 52 |
| FIGURA 12 - UBICACIÓN DE POZOS DE OBSERVACIÓN | 56 |
| FIGURA 13 - CARGA CALCULADA VS. OBSERVADA – RÉGIMEN PERMANENTE..... | 57 |
| FIGURA 14 - CARGA PIEZOMÉTRICA CALCULADA – RÉGIMEN PERMANENTE..... | 59 |
| FIGURA 15 - ZONAS DE RECARGA | 60 |
| FIGURA 16 - CARGA PIEZOMÉTRICA – ESCENARIO 1 | 66 |
| FIGURA 17 - CARGA PIEZOMÉTRICA – ESCENARIO 2 | 67 |
| FIGURA 18 - CARGA PIEZOMÉTRICA – ESCENARIO 3 | 68 |
| FIGURA 19 - CARGAS PIEZOMÉTRICAS CALCULADAS – NUEVOS CAMPOS DE POZO..... | 70 |
| FIGURA 20 - CARGAS PIEZOMÉTRICAS CALCULADAS – ÁREAS DE BOMBEO REDUCIDO | 71 |



AVISO

El presente documento expresa la opinión profesional del Proveedor de Servicios sobre los asuntos aquí expuestos, aplicando su criterio profesional y procediendo con cuidado razonable. Debe leerse en el contexto del Contrato de “Servicios de Inventario y Muestreo, Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología localizada de las Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní con fecha del 15 de Marzo de 2006 (el “Contrato”) entre SNC-Lavalin International, el Proveedor de Servicios y La Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (SG-OEA)_ (el “Cliente”), de la metodología, los procedimientos y las técnicas utilizados por el Proveedor de Servicios, las suposiciones del Proveedor de Servicios, y las circunstancias y restricciones bajo las cuales su mandato se llevó a cabo. Este documento fue redactado únicamente para fines del objetivo estipulado en el Contrato, y para beneficio exclusivo del Cliente, cuyos recursos se limitan a aquellos expuestos en el Contrato. Este documento debe leerse como un todo y, por lo tanto, el lector no deberá leer sus partes y secciones, o depender de éstas fuera de contexto.

En la preparación de cualquier estimación de valores técnicos o costos, el Proveedor de Servicios siguió una metodología y procedimientos, y procedió con cuidado prudente, a fin de ser congruente con el nivel de precisión buscado, aplicando su criterio y cuidado razonable y por tanto, en su opinión, es muy probable que los valores técnicos o costos reales serán compatibles con la estimación. Sin embargo, no debe implicarse garantía alguna en cuanto a la exactitud de las estimaciones. Salvo que se estipule expresamente lo contrario, las suposiciones, los datos y la información proporcionada por, o recopilada de otras fuentes (incluyendo el Cliente, consultores, laboratorios de prueba y proveedores de equipo, etc.) en los que se basa la opinión del Proveedor de Servicios, tal como se expresa en el presente, no fueron verificados por el Proveedor de Servicios. El Proveedor de Servicios no hace ninguna representación en cuanto a su exactitud y declina toda responsabilidad a este respecto, más allá de la responsabilidad expresamente establecida en el Contrato.

Dentro de los límites permitidos por las leyes aplicables y por el Contrato, el Proveedor de Servicios declina toda responsabilidad al Cliente y a terceras partes en cuanto a la publicación, referencia, cita o distribución de este informe o de cualquier parte de su contenido a una tercera parte y la dependencia en los mismos por ésta.



ABSTRACT

This report describes the construction, calibration, validation and use of the numerical model for the pilot area known as Rivera-Santana do Livramento. A finite difference model, using the MODFLOW numerical simulation code was selected, and a multi-layered model constructed to represent the Guaraní Aquifer System within the pilot area, which straddles the international border that separates the Uruguayan city of Rivera in the west from the Brazilian city of Santana do Livramento to the east.

In much of the pilot area the sandstones of the Guaraní Aquifer System are found at outcrop or immediately underlying the surficial deposits. They range in age from late Permian to Jurassic and represent a sedimentary sequence which developed from primarily fluvial in the early stages to primarily aeolian at the end. The pilot area is located within a recharge zone of the Guaraní Aquifer. The objective of the computer model was to develop a tool to assist in the management of the groundwater resources of the pilot area. To this end, three development scenarios were simulated, based on the relocation of some of the existing water supply wells.

The first scenario assumed that five new boreholes would be drilled in Parque Gran Bretaña and boreholes in the existing heavily developed area of Rivera would be shut down in order to reduce the pumping in that area by an amount equal to the capacity of the boreholes. The second scenario assumed that eight new boreholes would be drilled in Barrio Registro and a number of boreholes in the existing heavily developed area of Santana do Livramento would be shut down. The third scenario consisted of a combination of the first two scenarios. The conclusion from this exercise is that, for the relocation of wells to be effective in addressing the current over abstraction, it will be necessary to move them further afield within the pilot area. However recommendations are also made with regard to future monitoring and data collection in order to better define the hydrogeology of the area before further modeling is undertaken.

El informe describe la elaboración, calibración, validación y uso de un modelo numérico para el área piloto llamada Rivera-Santana do Livramento. Se seleccionó un modelo de diferencia finita, usando código de simulación numérica MODFLOW y se construyó un modelo de capas múltiples para representar el Sistema Acuífero Guaraní en el área piloto, que está atravesada por la frontera internacional que separa al oeste la ciudad de Rivera en Uruguay de la ciudad Santana do Livramento en Brasil hacia el este.

En la mayoría del área piloto las areniscas del Sistema Acuífero Guaraní son aflorantes o se hallan inmediatamente debajo de depósitos superficiales. La edad de éstas va desde el Pérmico tardío hasta el Jurásico representando una secuencia sedimentaria que se desarrolló en sus orígenes en un ambiente fluvial para culminar en un ambiente eólico al final. El área piloto está ubicada en una zona de recarga del Acuífero Guaraní. El objetivo del modelo computado es asistir en la planificación de desarrollo futuro del agua subterránea del área piloto. Se han desarrollado tres escenarios de simulación basados en la reubicación de pozos existentes para aprovisionamiento de agua potable.

El primer escenario asumió que se perforarían cinco nuevos pozos en el Parque Gran Bretaña y que se cerrarían pozos en la zona altamente desarrollada de Rivera a fin de reducir el caudal de bombeo en esa área por un monto igual a la capacidad de los nuevos pozos. El segundo escenario asumió que se perforarían ocho nuevos pozos en el Barrio Registro y se cerrarían un número de pozos en la zona altamente desarrollada de Santana do Livramento. El tercer escenario consistió en una combinación de los dos primeros. La conclusión del ejercicio es que a fin que la reubicación de pozos sea eficaz para corregir la situación actual de excesiva abstracción, sería necesario desplazarlos aún mas dentro del área piloto. Sin embargo, también se recomienda que se necesita realizar un monitoreo y colecta de datos mayor a fin de definir la hidrogeología del área antes de realizar otra modelación.



RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, acordado entre los Gobiernos de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y el Banco Mundial (BM), la firma SNC-Lavalin International Inc. recibió el mandato de parte de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (OEA), agencia ejecutora del proyecto; para llevar a cabo el estudio de “Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología localizada de las Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní”.

Este informe describe la elaboración, calibración, validación y uso del modelo numérico del área piloto denominada *Rivera-Santana do Livramento*, según los requerimientos establecidos por la OEA, para analizar la **Hidrogeología local de las áreas piloto**.

El Capítulo 1 presenta las características físicas del área de estudio y el código de modelo numérico usado en el estudio. El área piloto Rivera-Santana do Livramento está ubicada en la porción sur del Sistema Acuífero Guaraní, donde el acuífero aflora en el borde este de la Cuenca Norte de Uruguay, que es parte de la Cuenca sedimentaria Paraná. El área piloto cubre una extensión de 750 km² e incluye la frontera internacional que separa la ciudad Rivera en el Oeste, uruguay de la ciudad Santana do Livramento hacia el este en el lado Brasileño.

La topografía varía desde menos de 135 msnm en el Este hasta mas de 350 msnm en el Oeste e incluye varias fuentes de agua superficial que drenan el sur de Uruguay y el este de Brasil. La mayor elevación en el borde oeste del área de estudio está formado por el límite de las coladas de balasto del a Formación Arapey o Serra Peral. En otras partes dentro del área de estudio no hay presencia de basalto, excepto en pocas localidades donde ocurre con cubrimiento, y las areniscas del Acuífero Guaraní son aflorantes o se encuentran inmediatamente por debajo de depósitos superficiales.

Para realizar el Studio, se eligió el programa MODFLOW 2000 como código de simulación numérica. La experiencia en modelación de sitios complejos sugiere que los modelos MODFLOW sirven para simular flujo en sitios complejos, permitiendo simular flujo en estado permanente y en transitorio en forma tridimensional y en una variedad de situaciones simples o complejas. Se seleccionó Visual MODFLOW 4.2 Pro, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc., como la interfase gráfica para usuarios debido a que permite una fácil entrada de datos y una rápida salida de resultados



El Capítulo 2 introduce el modelo conceptual del área de estudio incluyendo el marco geológico e hidrogeológico. Los basaltos de la Formación Arapey/Serra Geral se extienden en cientos de kilómetros hacia el oeste del área de estudio, dónde actúan como una capa confinante sobre el Acuífero Guaraní; sin embargo, dentro del área de estudio actúan tanto como acuífero o como fuente de recarga limitada del acuífero subyacente y como una capa confinante o semi-confinante dependiendo de la distancia de la escarpa.

La unidad superior del Sistema Acuífero Guaraní es la Formación Rivera (Fm Botucatú superior en Brasil), o del Jurásico tardío, consistiendo de areniscas de grano medio a fino de color rojizo que afloran en varios puntos al pie de la escarpa de basalto y hacia el este en la cima de la más prominente divisoria de aguas dónde los depósitos Cuaternarios están ausentes. Sin embargo, no se extienden en toda el área de estudio. El espesor varía desde cero a 60 metros.

La Formación Rivera está superpuesta sobre depósitos de areniscas finas y asociaciones de la Formación Tacuarembó (Botucatú inferior en Brasil) que aflora o sub-aflora en el sector este y sur del área de estudio. Debajo de la Formación Tacuarembó, y constituyendo la unidad inferior del SAG, se hallan las areniscas de grano grueso a fino de la Formación Buena Vista. Esta formación que probablemente es Pérmico tardío a Triásico, y la cual es equivalente a la Formación Rosario do Sol de Brasil, aflora justo al este del área piloto y tiene un espesor promedio de 100 m en esta localidad.

Por debajo de la Formación Buena Vista sigue una secuencia de rocas generalmente de baja permeabilidad de edad Paleozoica que se apoyan en discordancia sobre las rocas del basamento cristalino Precámbrico.

El Capítulo 3 describe la construcción del modelo numérico, cuyo primer paso implica la definición del dominio del modelo. Donde fue posible se seleccionaron límites hidrogeológicos naturales es decir, divisorias de agua subterránea y ríos. Siguió la construcción de las capas del modelo basadas en el modelo conceptual que contienen las siguientes unidades hidroestratigráficas:

Unidad 1 – Formación Serra Geral (Arapey) -acuífero/acuitardo

Unidad 2 – Formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista – ej. Acuífero Guaraní

Unidad 3 – depósitos Pérmicos – ej. Acuitardo y unidades acuíferas de bajo rendimiento (excluyendo la parte inferior de la Formación Buena Vista, que probablemente es de edad Pérmico superior)



Unidad 4 - Precámbrico - i.e. acuícludo (no es una parte active del modelo)

Con la adición de los parámetros del acuífero (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) y la entrada de cargas derivadas del mapa de curvas piezométricas, el modelo fue completado y quedó listo para calibración.

El Capítulo 4 describe la calibración del modelo. Se corrió un modelo en régimen permanente y se realizó la calibración por el método de prueba y error comparando las cargas hidráulicas simuladas con las cargas observadas en los pozos. Se realizaron numerosas corridas con diferentes parámetros como conductividad hidráulica, recarga, condición de lecho de río y se ajustó los límites de carga. Los niveles de agua calculados corresponden a las observaciones en los pozos se compararon con los niveles de agua medidos en esos pozos y se usaron como data base para calibración de todo el dominio del modelo.

Una vez calibrado el modelo en régimen permanente, las cargas piezométricas derivadas del modelo en régimen permanente fueron usadas como datos de entrada al modelo en régimen transitorio. El modelo en régimen transitorio se usó para duplicar los resultados de ensayos de descarga en cada pozo en que se disponía de información.

El Capítulo 5 describe el uso del modelo para realizar predicciones de efectos resultantes de varios escenarios de desarrollo. Como existe evidencia de sobre explotación del agua subterránea en las áreas urbanas de ambas ciudades, los escenarios desarrollados propuestos consisten en reubicar un número de pozos y evaluar el impacto en los niveles de agua subterránea.

Para el primer escenario se asumió que cinco nuevos pozos, cada uno con una capacidad de 50 m³/h, serían perforados en el Parque Gran Bretaña y se cerrarían ocho pozos localizados en la altamente desarrollada ciudad de Rivera a fin de reducir el área de bombeo por una cantidad igual a la capacidad de los pozos.

El Segundo escenario asumió que ocho nuevos pozos, cada uno con una capacidad de 50 m³/d sería perforado en el Barrio Registro y siete pozos existentes en la fuertemente desarrollada ciudad de Santana do Livramento serían cerrados a fin de reducir el bombeo en el área en una cantidad igual a la capacidad de los nuevos pozos.

Un tercer escenario consistió en la combinación de los dos primeros simulados. Los efectos de la reubicación de pozos se restringió a las inmediaciones vecinas de los campos de pozos y tuvo poco o ningún impacto sobre las cargas piezométricas calculadas a través del área piloto.



El Capítulo 6 presenta las conclusiones del ejercicio de modelación, una de las cuales es la ausencia de un cambio significativo de las cargas piezométricas como resultado de la reubicación de pozos debido al hecho de que los reubicados siguen bombeando agua del mismo sector del acuífero y que para ser eficaz, los pozos deberían ser reubicados mas lejos dentro del área piloto. También se concluyó que una porción considerable de la recarga del acuífero dentro del área de estudio es subsecuentemente descargada como flujo bajo hacia los cursos de agua y ríos.

El Capítulo 7 enuncia un número de recomendaciones provenientes del estudio. Las mismas, destacan la necesidad de realizar un monitoreo fiable en el tiempo y un programa de colecta de datos dentro del área piloto, a fin de permitir el manejo eficaz del recurso hídrico subterráneo. Asimismo, se recomienda que no se realicen otros modelos del área piloto hasta obtener la colecta de nuevos datos y se halla confirmado el modelo conceptual de la misma.



1.0 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el marco del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, acordado entre los Gobiernos de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y el Banco Mundial (BM), la firma SNC-Lavalin International Inc. recibió el mandato de parte de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (OEA), agencia ejecutora del proyecto; para llevar a cabo el estudio de “Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología localizada de las Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní”.

Este informe describe la construcción, calibración, validación y uso del modelo numérico para el área piloto conocida como *Rivera-Santana do Livramento*. El área piloto también se denomina Rivera-Santana o *Rivera-Livramento*, en la Figura 1 se presenta su ubicación.

Un modelo matemático de agua subterránea es un intento de entender el sistema de flujo y traducirlo a términos matemáticos. Para desarrollar un modelo matemático se necesita en primer lugar tener un entendimiento claro de la ocurrencia y el movimiento del agua subterránea en el área de interés, es decir, es necesario desarrollar un modelo conceptual que identifique los procesos y elementos físicos relevantes que controlan el flujo de agua subterránea en el acuífero. El modelo conceptual indica entonces cómo se traduce el mundo real en el modelo matemático.

El área piloto Rivera-Livramento se localiza en la parte sur del Sistema Acuífero Guaraní, donde el acuífero aflora en el borde oriental de la Cuenca Norte de Uruguay (De Santa Ana, 1989) que es parte de la cuenca sedimentaria del Paraná.

El área piloto cubre un área de 750 km² y se extiende a ambos lados de la frontera internacional que separa la ciudad uruguaya de Rivera, en el oeste, de la ciudad brasileña de Santana do Livramento, al este. Rivera es la capital del departamento de Rivera y, en 2004, tenía una población de aproximadamente 64.500 habitantes. Santana do Livramento está ubicada en el estado brasileño de Rio Grande do Sul, y en el año 2005 tenía una población de aproximadamente 97.500 habitantes.

La topografía varía entre elevaciones de menos de 135 msnm en el este, a más de 350 msnm en el oeste, e incluye las cuencas de los ríos Cuñapirú y Curticeiras en el lado uruguayo, que drenan en dirección sur, y de los ríos Florentina, do Salso y Forno del lado brasileño, que drenan en dirección este.



Figura 1 – Extensión del Sistema Acuífero Guaraní y ubicación de las áreas piloto



El terreno más elevado en el borde occidental del área de estudio se compone por el límite oriental de los flujos de basalto de la formación Arapey o Serra Geral. Las rocas afloran sobre el 17% del área piloto con una escarpa orientada al este sureste. En el resto del área de estudio el basalto está ausente, excepto en algunos pocos lugares donde aparece como relicto exterior, y las areniscas del Acuífero Guaraní se encuentran en los afloramientos o inmediatamente debajo de los depósitos superficiales.

El acuífero Guaraní o el Sistema Acuífero Guaraní o SAG es la principal fuente de agua subterránea en el área piloto. El uso correcto de los términos *Acuífero Guaraní* y *Sistema Acuífero Guaraní* es un tema de un debate actual, sin embargo se puede decir en términos simples que el sistema acuífero consiste en una secuencia sedimentaria de areniscas que van desde la era Pérmica tardía o Triásico temprano hasta el Jurásico, y que las unidades más importantes del acuífero son las areniscas jurásicas conocidas en Uruguay como las formaciones Rivera y Tacuarembó, y en Brasil como la formación Botucatú.

Las areniscas de la unidad principal del acuífero afloran en el área piloto y las unidades inferiores del sistema acuífero afloran hacia el este del área piloto.

1.2 El Modelo Conceptual

Antes de construir un modelo informático se necesita tener el modelo conceptual de la hidrogeología del área de estudio. Un modelo conceptual es simplemente el entendimiento de los procesos que conforman un sistema real; en el contexto hidrogeológico, esto equivale al entendimiento del sistema de flujo de agua subterránea.

El modelo conceptual identifica y describe los procesos y elementos físicos que controlan el flujo de agua subterránea en el área de estudio, tales como el marco de referencia geológico, el marco de referencia hidrogeológico, las propiedades de los acuíferos y las fuentes de recarga y descarga. Sin embargo, dado que el modelo conceptual es simplemente una idea o un entendimiento (es decir, un concepto), es necesario describirlo por medio de mapas, superficies, secciones transversales y textos relacionados. Esto requiere una recopilación e interpretación de una gran variedad de información.

Los pasos claves para la formulación de un modelo conceptual incluyen la definición de las unidades hidroestratigráficas, la preparación del balance hídrico y la definición del sistema de flujo de agua subterránea. Sin embargo, el desarrollo de un modelo conceptual y la construcción del modelo informático involucran algo de simplificación y clasificación de la información, ya que no es factible la reconstrucción completa del sistema real, con todas sus



complejidades. No obstante, cuanto mas se aproxime el modelo conceptual a la situación de campo, más exacto será el modelo numérico.

1.3 El modelo informático

1.3.1 El código de modelación

Se utilizó MODFLOW 2000 (Harbaugh et al., 2000) como el código de simulación numérica para el estudio. La experiencia en modelación de sitios complejos sugiere que los modelos MODFLOW diseñados correctamente son apropiados para simular el flujo de agua subterránea en escenarios complejos. MODFLOW es capaz de simular el flujo de agua subterránea tridimensional en un régimen permanente y transitorio en una variedad de entornos que van desde el más simple al más complejo. Su flexibilidad puede acomodar áreas de hidroestratigrafía variable en tres dimensiones y patrones complejos de flujo en las cercanías de las corrientes de agua y los pozos de suministro de agua, como también las propiedades heterogéneas de los materiales. MODFLOW tiene muchas opciones para representar fuentes y sumideros. Estas opciones ofrecen suficiente flexibilidad para representar las características importantes de las áreas de estudio.

MODFLOW se basa en una fórmula de diferencias finitas centrada en bloques. Ya que esta fórmula se desarrolló a partir de un registro local de balance de fluido, los modelos convergentes MODFLOW son de conservación de masa a escala local y global. MODFLOW también admite un esquema de interpolación de velocidad simple para los cálculos de rastreo de partículas. El código de rastreo de partículas MODPATH (Pollack, 1994) le da a MODFLOW la capacidad de desarrollar líneas de trayectoria y análisis de tiempo de recorrido precisos. El programa de utilidad ZoneBudget (Harbaugh, 1990) es una calculadora de balance hídrico.

Se seleccionó el programa Visual MODFLOW 4.2 Pro, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc. (WHI, 2003), como la interfaz gráfica de usuario para este estudio porque permite el ingreso fácil de información, y arroja resultados rápidamente. La cuadrícula del modelo, el ingreso de información, y los resultados se pueden visualizar en una vista plana o en una sección transversal en cualquier momento durante el desarrollo de los modelos.

MODFLOW es un modelo de diferencias finitas centrada en bloque que tiene una entrada modular con paquetes separados o subrutinas para manejar los ríos, drenajes, evapotranspiración, recarga y pozos. Un programa o un código de computación resuelve una



serie de ecuaciones algebraicas generadas al aproximar las ecuaciones diferenciales parciales (ecuación regente, condiciones de borde y condiciones iniciales) que conforman el modelo matemático. Las técnicas de aproximación tales como la de diferencias finitas o los métodos de elementos finitos operan en un modelo matemático y lo transforman a una forma que la computadora puede resolver rápidamente. Los métodos numéricos resuelven el conjunto de ecuaciones algebraicas, representadas como una ecuación matriz.

1.3.2 La cuadrícula del Modelo

El enfoque de diferencias finitas utilizado en el MODFLOW incluye la definición del área a ser modelada como una serie de celdas que están alineadas en filas, columnas y capas. Este proceso se denomina discretización del área del modelo y entonces el enfoque de diferencias finitas simula las cargas hidráulicas en cada celda para que el volumen de agua que entra a esa celda sea igual al volumen que sale de la celda. El arreglo de celdas constituye la cuadrícula del modelo.

El modelo se compone de una cuadrícula de nodos, ya sea cuadrada o rectangular. Al añadir capas en sentido vertical, estos nodos se convierten en cubos o sólidos rectangulares tridimensionales. La cuadrícula horizontal debe ser la misma para cada capa. La selección del espaciamiento nodal es crítica, pero en el Visual MODFLOW, este espaciamiento se puede ajustar durante el proceso de modelación. Se pueden agregar filas y columnas adicionales en sentido horizontal en áreas donde las elevaciones de las capas cambian rápidamente o la pendiente de la superficie potenciométrica es alta.

Un cambio en la carga en la dirección vertical influirá en la selección del espaciamiento nodal vertical. Un factor secundario a tener en cuenta al seleccionar el espaciamiento nodal es la variabilidad de las propiedades del acuífero. Las capas del modelo generalmente corresponden a las unidades hidroestratigráficas.

Ya que la modelación puede requerir recursos informáticos significativos en términos de la memoria utilizada y los tiempos de prueba del modelo para su convergencia, el diseño de la cuadrícula debe realizarse cuidadosamente limitando el área de la mayor resolución espacial al área de interés inmediato. Al diseñar un modelo cuidadosamente, éste puede permanecer a nivel regional mientras que conserve una resolución espacial que sea adecuada para tratar los objetivos del estudio. La ubicación del área detallada del modelo se debe guiar por un reconocimiento de la ubicación de los esfuerzos críticos y de los temas que el modelo a ser desarrollado tiene que tratar.



1.3.3 Parámetros del Modelo

Entre los parámetros a ingresar al modelo se tienen: topografía, geología, hidrogeología (es decir, las superficies inferiores y superiores de los acuíferos y acuitardos, la conductividad hidráulica) y las elevaciones de las corrientes de agua.

La información se ingresa en el modelo en zonas, las cuales están compuestas de un grupo de celdas que tienen propiedades similares. De esta manera las propiedades pueden variar espacialmente a través del modelo para aproximarse al modelo conceptual que fue desarrollado para el dominio del modelo.

1.3.4 Condiciones de borde

Las condiciones de borde definen cómo se relaciona el modelo con el ambiente que lo rodea, tanto de forma lateral como vertical, es decir, como interactúa con el área más allá del dominio del modelo. Los bordes físicos de los sistemas de flujo de agua subterránea se componen de formaciones relativamente impermeables, ya sean formaciones en roca o ricas en arcilla, o cuerpos de agua superficial. Otros bordes se forman como resultado de condiciones hidrogeológicas, e incluyen divisorias y láminas de agua subterránea. Las divisorias de agua subterránea forman bordes hidráulicos cuyas ubicaciones están influenciadas por la presencia de características físicas. Las láminas divisorias separan los sistemas de flujo somero de los sistemas de flujo profundo. Todos los bordes hidráulicos son características transitorias que pueden cambiar de ubicación o desaparecer si cambian los esfuerzos del sistema.

Los bordes hidrogeológicos se clasifican en tres tipos:

- | | | |
|--------|---|--|
| Tipo 1 | - | Carga específica - (condiciones Dirichlet) – la carga es específica |
| Tipo 2 | | bordes de flujo específicos (condiciones Neumann) – el flujo a través del borde está dado, incluyendo un borde sin flujo (flujo cero). |
| Tipo 3 | | bordes de flujo de carga dependiente (Cauchy o condiciones mezcladas de borde) – para los cuales el flujo a través del borde se calcula con una condición dada de carga al borde. Esta condición de borde relaciona las cargas de borde con los flujos de borde. |



En MODFLOW, todas las opciones para simular las condiciones de borde también se pueden utilizar en el interior del dominio del modelo para simular fuentes y sumideros de agua o bordes internos. Las condiciones dependientes de la carga se pueden utilizar para simular ríos, lagos y drenajes en el interior de la cuadrícula. La diferencia entre las condiciones de borde dependientes de la carga y las condiciones internas dependientes de la carga generalmente se tornan borrosas porque las mismas opciones del modelo se utilizan para representar a ambas condiciones. Acá se analizan las condiciones de borde y las fuentes y sumideros internos.

Idealmente, un modelo numérico de flujo de agua subterránea debe abarcar bordes hidrogeológicos naturales tales como divisorias de aguas subterráneas. En algunos casos, estos bordes naturales se encuentran tan alejados del área de interés que no resulta práctico extender el modelo hasta un dominio tan extenso. En otros casos no se conoce con exactitud la extensión de la influencia de los pozos de bombeo a ser simulados entonces el dominio del modelo puede tener que ser exagerado al principio para abarcar estas zonas. No es necesario extender el modelo hasta bordes remotos siempre y cuando el modelo sea lo suficientemente amplio para que los efectos de los esfuerzos (pozo descargando) en el área de interés no se propaguen hasta el perímetro del modelo. Si los esfuerzos afectan las condiciones a lo largo del perímetro del modelo (es decir conos de abatimiento de los pozos o líneas de flujo de zonas de captura que se extienden hasta los bordes del modelo), los resultados podrían ser afectados artificialmente por estas condiciones de borde y el truncamiento del modelo.



2.0 EL MODELO CONCEPTUAL DE RIVERA- LIVRAMENTO

2.1 Desarrollo de un Modelo conceptual

El modelo conceptual consolida la información geológica, hidrogeológica e hidrológica para el área de estudio en una serie de suposiciones y conceptos que se pueden expresar cuantitativamente. Estas se puede ilustrar utilizando mapas de curvas de nivel, diagramas y secciones transversales. Los componentes más importantes son los marcos geológicos e hidrogeológicos y las propiedades hidráulicas.

Marco geológico. El marco geológico describe la distribución, la configuración, y la estructura física de los acuíferos subyacentes y de las unidades de confinamiento. El espesor y la continuidad de las unidades, las litologías representativas dentro de las unidades, y la estructura geológica de las unidades son los factores importantes a tener en cuenta.

Marco hidrogeológico. El marco hidrogeológico describe el movimiento del agua y otros fluidos dentro del marco geológico. Esto incluye la naturaleza de los acuíferos (por ejemplo el flujo en medio poroso o en fractura); los bordes hidráulicos; las gradientes verticales e hidráulicos; las cargas hidráulicas y su variación con el tiempo; los sentidos de movimiento del agua subterránea; la ubicación de las áreas de carga y descarga de agua subterránea; y la existencia y estabilidad de las divisorias de agua subterránea dentro del área.

Propiedades hidráulicas. Estas incluyen la transmisividad, la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, y la porosidad eficaz. Además es necesario considerar la heterogeneidad y anisotropía de los acuíferos sobre el dominio del modelo.

2.2 El marco geológico

Como se mencionó anteriormente, el área de estudio yace en la Cuenca Norte de Uruguay que es una cuenca intracratónica que representa la deposición desde la era Devónica hasta el Cretácico tardío.

Las rocas mas jóvenes de importancia en el área de estudio son los basaltos de la formación Arapey/Serra Geral, que son de edad Cretácica, y afloran en la parte oeste del área de estudio donde alcanzan un espesor de decenas de metros, concluyendo abruptamente en una escarpa. Estas rocas se extienden hasta cientos de kilómetros hacia el oeste del área de estudio, donde actúan como una capa de confinamiento sobre el Acuífero Guaraní, sin embargo, dentro del área de estudio actúan como un acuífero local o como una fuente de



recarga limitada para el acuífero subyacente, y como una capa de confinamiento o de semi confinamiento dependiendo de la distancia desde la escarpa.

La formación Rivera (Botucatú superior) es la unidad superior del SAG, probablemente del Jurásico tardío, y de origen eólico. Las rocas se componen de areniscas rojizas de grano fino a medio y con estratigrafía cruzada. Estas areniscas afloran en varios puntos en las estribaciones de la escarpa basáltica y hacia el este en el techo de las divisorias de agua más prominentes donde están ausentes los depósitos Cuaternarios. Sin embargo no se extienden a través del área de estudio, y están ausentes en el este y el sureste de dicha área. El espesor varía de cero a 60 metros.

Bajo la formación Rivera se encuentran los sedimentos arenosos y los depósitos asociados de la formación Tacuarembó (Botucatú inferior en Brasil). Estas areniscas finas intercaladas con argilitas limosas y argilitas, con estratificación paralela y cruzada, probablemente pertenecen al Jurásico medio a superior y tienen un espesor que llega hasta los 100 metros. Ellas afloran o sub afloran en las zonas este y sur del área de estudio.

Debajo de la formación Tacuarembó se encuentran areniscas de grano fino a grueso, con lentes de sedimentos finos y la capa de la formación Buena Vista. Esta formación, que es equivalente a la Rosario do Sul de Brasil, aflora justo al este del área piloto y en este lugar tiene un espesor promedio de cerca de 100 m.

No hay consenso sobre la edad de la formación Buena Vista, ya que algunos autores la describen como totalmente del Pérmico, otros como Triásica, y algunos otros la ubican en el Pérmico tardío y el Triásico temprano (de Santa Ana et al, 2006). Trabajos paleontológicos recientes (Piñeiro et al, 2007) concluyeron que la formación pertenece a la edad Permo-Triásica.

Inmediatamente debajo de la formación Buena Vista se encuentran las limolitas y las argilitas del Grupo Melo (formación Fraile Muerto). Estas pertenecen a la edad Pérmica, tienen un espesor de más de 100 metros, y están sobre una secuencia compleja de areniscas, tilitas, y depósitos estratificados ("varved") de las formaciones Tres Islas, Cerro Pelado y San Gregorio, que representan el Pérmico inferior a medio.

Las rocas Paleozoicas yacen, discordantemente, sobre rocas cristalinas de baja permeabilidad del basamento Precámbrico.

Para una descripción más detallada del modelo conceptual se remite al lector al informe *Hidrogeología local del área piloto Rivera-Santana do Livramento* (SNC-Lavalin, 2008).



2.3 El marco hidrogeológico

2.3.1 Principales unidades hidroestratigráficas

Para los propósitos del presente estudio la primera unidad significativa es el basalto de la formación Serra Geral (también denominada formación Arapey) que pertenece a la era Cretácica y, en las demás partes, constituye una capa confinante de muy baja permeabilidad para el Acuífero Guaraní subyacente. Sin embargo, el área piloto se sitúa en el borde de la capa de basalto, de este modo solo una parte del área de estudio está realmente cubierta con el basalto y se cree que aquí funciona como fuente de recarga de las areniscas cercanas a los bordes del afloramiento, y como una capa semi-confinante.

Dejando de lado por un momento las unidades de arenisca del SAG, el siguiente componente significativo del marco hidrogeológico es el techo del Grupo Melo (formación Fraile Muerto). Se considera que este horizonte marca el límite inferior del SAG, según se definió para fines de modelación en el presente estudio, y el techo de la secuencia de rocas sedimentarias generalmente de baja permeabilidad de la era Pérmica. Aunque dentro de la secuencia Pérmica hay algunas unidades que, cuando aparecen a poca profundidad, se pueden explotar para el suministro a pequeña escala de agua, se puede considerar a la secuencia completa como un acuitardo en comparación con el Acuífero Guaraní. Se encuentran excepciones en las areniscas Tres Islas (Gilboa et al., 1976), las cuales, en el afloramiento, tienen una producción de alrededor de 2 m³/h, y en partes de la San Gregoria, las que han reportado una producción de hasta 40 m³/d (Collazo et al, 2005).

Se cree que en el área de estudio los depósitos Pérmicos se asientan discordantemente sobre el basamento cristalino Precámbrico que, para los fines de la modelación, se consideran impermeables y de este modo funcionan como un acuícludo inferior.

2.3.2 Los componentes del Acuífero Guaraní

Debe notarse que en algunas de las definiciones del Sistema Acuífero Guaraní se incluyen, como parte del sistema, las rocas paleozoicas, mientras que otras restringen el término SAG a las areniscas triásicas y jurásicas. Además, el raciocinio actual parece favorecer la restricción del nombre a las areniscas jurásicas, que son las unidades portadoras de agua más importantes. Sin embargo, para los propósitos del presente ejercicio de modelación, se considera que el SAG incluye los sedimentos de las formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista, que van desde la era Pérmica tardía hasta la Jurásica. Ellas representan una



secuencia sedimentaria que se desarrolló desde principalmente fluvial en los primeros estadios hasta principalmente eólica hacia el final.

La bibliografía revisada indica que la **formación Rivera** (anteriormente denominada miembro superior de la formación Tacuarembó) es generalmente la unidad más permeable y constituye el principal componente contenedor de agua del SAG debido a su naturaleza de areniscas eólicas con granos medianos bien clasificados. En comparación, las rocas de la **formación Tacuarembó** subyacente (anteriormente descritas como el miembro inferior de esa formación) se depositaron bajo condiciones fluviales y con un componente de granos finos (algo de limos) que constituyen así un acuífero con una producción un tanto inferior.

La unidad más baja del SAG, tal como se definió para fines de este ejercicio de modelación, es la **formación Buena Vista**, la cual está debajo de la formación Tacuarembó y que tiene menor permeabilidad debido al predominio de limos, areniscas finas y algo de arcilla.

2.3.3 El sistema de flujo de agua subterránea

Cuando se la ve en una escala local, el área Rivera-Santana do Livramento parece estar ubicada en el área de recarga de la parte sur del Sistema Acuífero Guaraní, como se muestra en la sección transversal esquemática preparada como parte de este estudio (Figura 2) y también en el mapa piezométrico preparado anteriormente por Oleaga, 2002 (Figura 3). Bajo condiciones naturales parece que, antes del desarrollo de los pozos y perforaciones en Rivera y Santana do Livramento, habría habido una divisoria de agua subterránea dentro del área de recarga, con algún flujo viajando en dirección este y sureste y apareciendo como caudal de base en las corrientes y ríos, y el resto fluyendo bajo el basalto hacia el oeste, para contribuir al flujo principal dentro del acuífero. Sin embargo, con la amplia extracción de agua subterránea que ha tenido lugar en las dos ciudades durante años, ahora hay una zona de cargas piezométricas reducidas que probablemente han causado un cambio dentro de las divisorias de agua subterránea dando como resultado que no haya flujo desde el área piloto hacia el oeste.

La amplitud del bombeo ha resultado en una situación donde, aún cuando se cierre un pozo para determinar su nivel estático de agua (NEA), el nivel de agua estabilizado no es indicativo del nivel de agua original en ese lugar anterior al bombeo, pero se puede describir mejor como un “nivel cuasi-estático de agua” que indica que ha tenido lugar la sobreexplotación de agua subterránea. Esto no presenta un problema, mientras se reconozca que no representa ni las condiciones piezométricas previas al desarrollo (cuando no existía bombeo), ni los niveles de bombeo reales en los pozos.



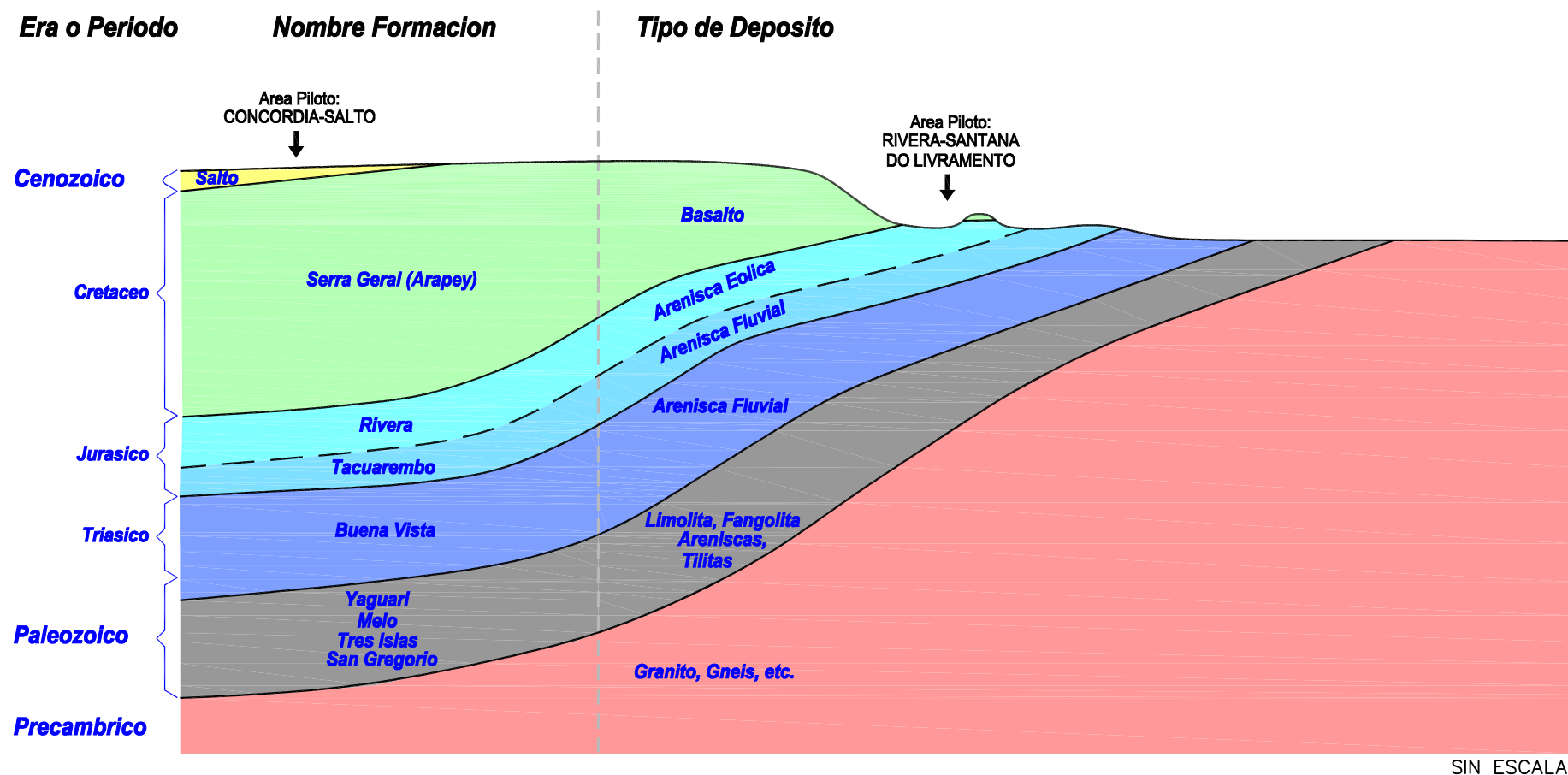
Utilizando la información disponible se preparó un mapa de curvas piezométricas para el área piloto, el cual se presenta en el informe *Hidrogeología local del área piloto Rivera-Santana do Livramento* (SNC-Lavalin, 2008). Este mapa (Figura 4) se utilizó como punto de partida para el modelo y se utilizaron los niveles estáticos de agua en los pozos como referencias contra los cuales se calibró el modelo.

Se reconoce que en algunos lugares habrá inexactitudes debido a la falta de información, sin embargo se cree que las curvas de nivel en la Figura 4 representan razonablemente la dirección del flujo de agua subterránea dentro de las principales unidades de arenisca del Acuífero Guaraní en Rivera-Santana do Livramento.

En términos del movimiento real de agua subterránea queda claro que la mayor parte del movimiento de agua subterránea tiene lugar dentro de las areniscas Triásicas-Jurásicas (es decir el Acuífero Guaraní) en vez de dentro de los depósitos paleozoicos subyacentes. Además, aunque hay puntos de vista conflictivos acerca de qué partes de la arenisca corresponden exactamente a las formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista, la opinión tradicional en general sostiene que la parte más permeable de la secuencia de arenisca es la parte superior que se depositó bajo condiciones eólicas en lugar de las formaciones más bajas (Tacuarembó y Buena Vista) que representan mejor los medio ambientes fluviales y lacustres. De este modo se espera que la mayor parte del movimiento de agua subterránea se desarrolle dentro de la formación Rivera.

Habiendo dicho esto, debe notarse que Rodríguez et al (2006) en su trabajo de modelación en este área, llegaron a la conclusión de que la zona somera dentro del acuífero era menos permeable que la zona más profunda. Ellos indicaron que esto se basó en la información suministrada por las personas involucradas en la perforación y construcción de los pozos, y también en la presencia de gradientes hidráulicos verticales descendientes en algunos lugares.

Figura 2
SECCION TRANSVERSAL ESQUEMATICA - MODELO SUB-REGIONAL



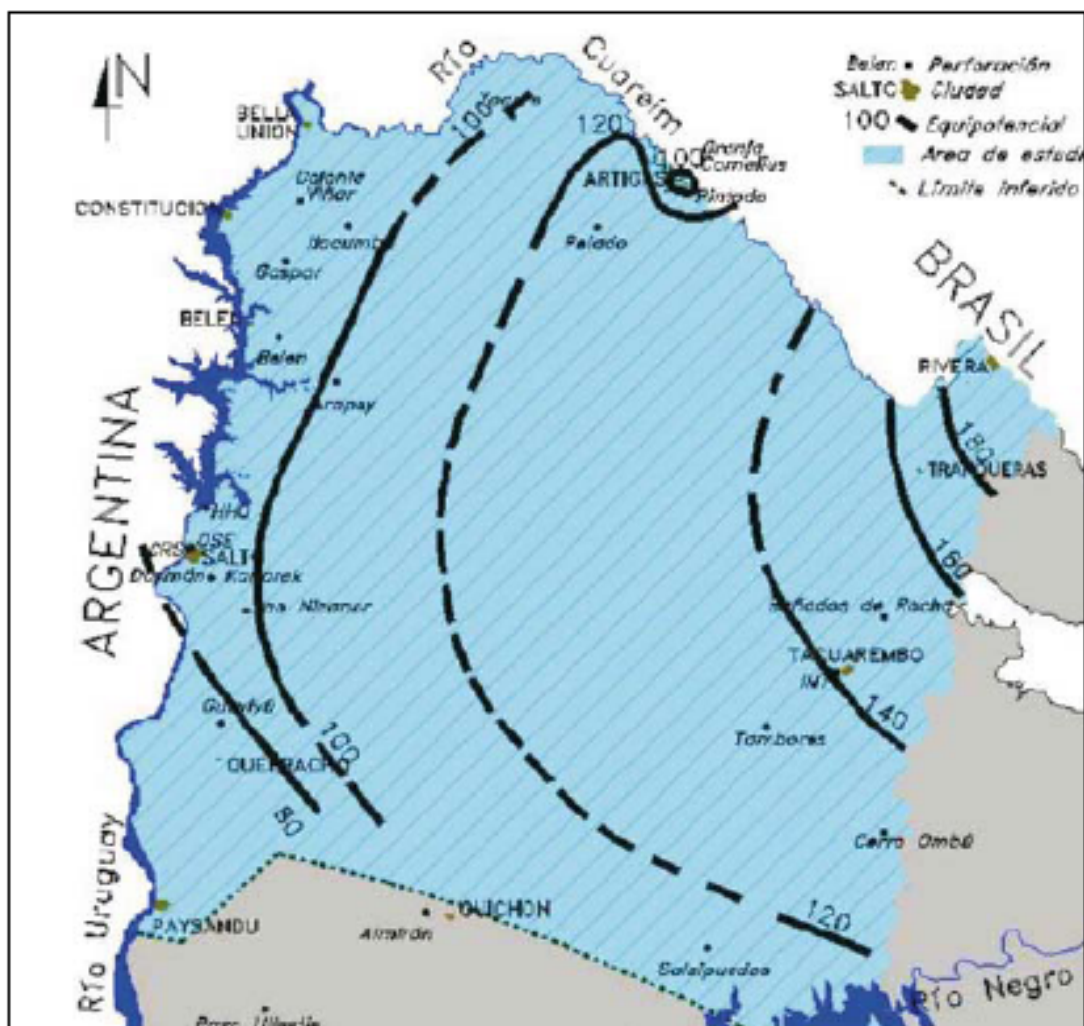


Figura 3 - Curvas piezométricas del acuífero Guaraní en el norte de Uruguay (según Oleaga, 2002)



SNC•LAVALIN
International



**Charlesworth
& Associates**
CONSULTING HYDROGEOLOGISTS

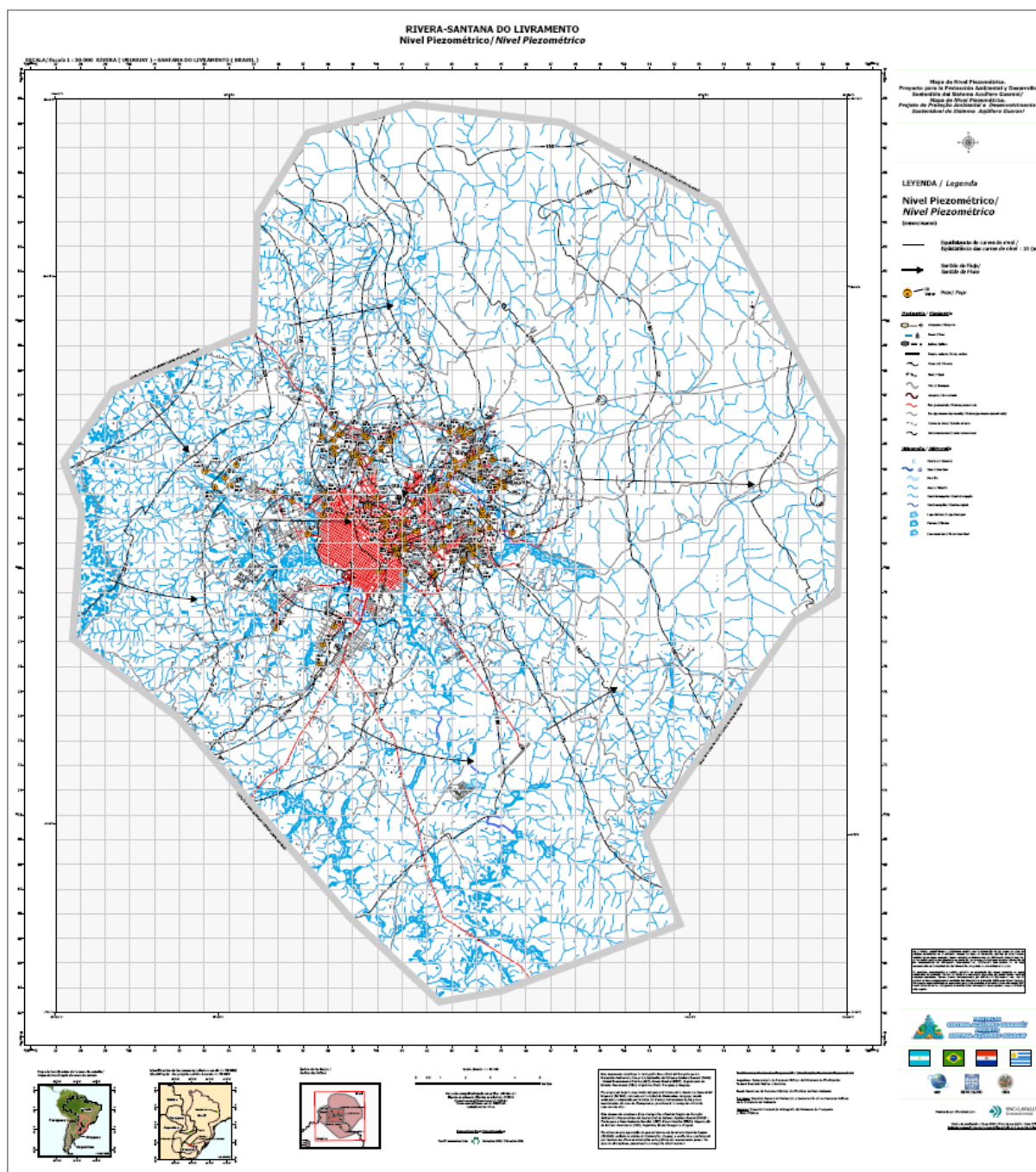


Figura 4 – Mapa de curvas piezométricas del área piloto Rivera-Santana do Livramento



SNC-LAVALIN
International



**Charlesworth
& Associates**
CONSULTING HYDROGEOLOGISTS



2.4 Propiedades hidráulicas

Conductividad hidráulica y transmisividad

El programa Visual MODFLOW necesita que se ingrese la conductividad hidráulica en el modelo y el pre-procesador luego convierte esos valores en transmisividad, la cual es una función del espesor del acuífero (o capa).

Las características del acuífero son una parte importante de cualquier modelo y el presente ejercicio ha demostrado que el modelo es sensible a las variaciones en la conductividad hidráulica, por lo tanto es importante llegar a un cálculo razonable para ese parámetro, el cual puede variar de lugar a lugar dentro del modelo, y también puede variar con la profundidad.

Como parte del presente estudio se desarrollaron ensayos hidráulicos en cuatro sitios dentro de las ciudades de Rivera y Santana do Livramento y la información obtenida y los análisis respectivos se presentan en el informe de *Análisis de ensayos hidráulicos (SNC-Lavalin, 2008)*. La Tabla 1 presenta un resumen de los resultados de esos cuatro ensayos, de los cuales solo tres fueron apropiados para ser analizados. El informe concluyó que la transmisividad varió entre 2,2 y 109 m²/d, y se descartaron los valores menores a este rango por ser dudosos. En la Tabla 2 se presentan las conductividades hidráulicas que derivaron de los valores de transmisividad en la Tabla 1, basándose en el espesor promedio de las unidades del acuífero.

Una segunda fuente de información sobre la conductividad hidráulica del acuífero fue un estudio desarrollado para el *Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní* bajo el Fondo de Universidades y presentado por Rodríguez et al (2006) y Gómez et al (2006), que también se incluyó en una tesis de Maestría en la Universidad Nacional del Litoral, en Argentina (Gómez, 2007).



Tabla 1 - Área Piloto Rivera Santana – Resumen de Resultados del Análisis de los Ensayos Hidráulicos

| Ensayo Hidráulico | Pozo | Tipo de Pozo | Abatimiento Máx. (m) | Distancia Radial (m) | Método | Transmisividad (m ² /día) | Coefficiente de Almacenamiento | Comentarios |
|---|-------|--------------|----------------------|----------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| Parque Hidráulico <i>Promedio</i> <i>Descarga:</i> 15,8 m ³ /h (H11) 19,1 m ³ /h (H7) <i>Duración del ensayo</i> 73 hs | H- 11 | B | 53 | N/D | Penetrado Completo Hantush | 0,5 | N/D | Adaptación de curva aceptable. El abatimiento de sólo 0,34 m en el pozo de observación, hace que los resultados sean cuestionables. Los valores parecen bajos, pero se alcanzó una buena aceptación con información de recuperación de acuerdo a los resultados de abatimiento. Ningún registro de pozo disponible. Se estima que el pozo es de arenisca y un pozo abierto en la totalidad de la profundidad del pozo. |
| | H-9 | O | 0,34 | 116 | | 93 | $2,72 \times 10^{-2}$ | |
| | H-7 | B | 30 | N/D | | 14,5 | $1,45 \times 10^{-1}$ | |
| | H- 11 | B | 53 | N/D | Agarwal + Hantush | 0,3 | $9,84 \times 10^{-2}$ | |
| Armour <i>Promedio</i> <i>Descarga:</i> 46 m ³ /h <i>Duración del ensayo:</i> 77 hs | AR- 4 | B | 36,4 | N/D | Penetrado Completo Hantush Tiempo= 7 min | 5,6 | N/D | Las frecuencias de bombeo durante los primeros 7 minutos del ensayo se dedujeron del promedio de lecturas del caudalímetro y no se consideraron confiables; por lo tanto se eliminaron los primeros 7 minutos y se analizaron para fines comparativos. El espesor del Acuífero se estimó en 100 m basándose en el perfil de ARC 9 GIS. Excelente adaptación. Ningún registro de pozo disponible. Se estima que es un pozo de arenisca con perforación abierta en la totalidad de la profundidad. |
| | AR- 5 | O | 4,1 | 96,9 | | 81 | $2,08 \times 10^{-4}$ | |
| | AR- 4 | B | 36,4 | N/D | Penetrado Completo Hantush Tiempo=0 | 2,22 | N/D | |
| | AR- 5 | O | 4,1 | 96,9 | | 109 | $2,92 \times 10^{-4}$ | |
| | AR- 4 | B | 36,4 | N/D | Penetrado Parcial Hantush Tiempo = 7 min | 68 | N/D | |
| | AR- 5 | O | 4,1 | 96,9 | | 51,3 | $4,39 \times 10^{-4}$ | |
| | AR- 4 | B | 36,4 | N/D | Agarwal - Penetrado Completo Hantush (recuperación) | 4,5 | $4,46 \times 10^{-3}$ | Buena adaptación. No se logró adaptación para las condiciones de penetrado parcial. |



| Ensayo Hidráulico | Pozo | Tipo de Pozo | Abatimiento Máx. (m) | Distancia Radial (m) | Método | Transmisividad (m2/día) | Coefficiente de Almacenamiento | Comentarios |
|---|--|--------------|----------------------|----------------------|--|-------------------------|--------------------------------|---|
| Central Eléctrica <i>Descarga: 75 m3/h</i> <i>Duración del ensayo: 73 hs</i> | 10-4-037 | B | 29,22 | N/D | Penetrado Parcial Hantush | 39 | N/D | El Ensayo Hidráulico fue precedido por un período de recuperación. El “análisis de horario cambiado” cambia el inicio del bombeo real a Hora = 0, lo cual proporciona una mejor adaptación de curva y valores de transmisividad en línea con otros valores publicados. No se pudo lograr adaptación de curva para la información de horario cambiado y condiciones de penetrado parcial. Sin embargo, los pozos están en condiciones cercanas a un penetrado completo, y los valores de penetrado completo y penetrado parcial (sin cambio de horario) son comparables. |
| | 10-4-038 | O | 10,37 | 143 | | 19 | $7,44 \times 10^{-2}$ | |
| | 10-4-037 | B | 29,22 | N/D | Penetrado Completo Hantush | 39 | N/D | |
| | 10-4-038 | O | 10,37 | 143 | | 13 | $5,25 \times 10^{-2}$ | |
| | 10-4-037 | B | 29,22 | N/D | Penetrado Completo Hantush con cambio de horario | 44,3 | N/D | |
| | 10-4-038 | O | 10,37 | 143 | | 60 | $1,99 \times 10^{-1}$ | |
| Británico | Frecuencias de bombeo no disponibles, no se pudo analizar. | | | | | | | |

NOTA: B – Bombeo; O - Observación



Tabla 2 – Valores de conductividad hidráulica calculados a partir de los resultados de los ensayos hidráulicos

| Ensayo hidráulico | Pozo | Tipo de pozo | Transmisividad (m ² /día) | Grosor del acuífero (m) | Conductividad hidráulica (m/d) |
|--------------------------|----------|--------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Parque hidráulico | H- 11 | B | 0,5 | 150 | 0,003 |
| | H-9 | O | 93 | | 0,62 |
| | H-7 | B | 14,5 | | 0,10 |
| | H-11 | B | 0,3 | | 0,002 |
| Armour | AR-4 | B | 5,6 | 94 | 0,06 |
| | AR-5 | O | 81 | | 0,86 |
| | AR-4 | B | 2,22 | | 0,02 |
| | AR-5 | O | 109 | | 1,16 |
| | AR-4 | B | 68 | | 0,72 |
| | AR-5 | O | 51,3 | | 0,55 |
| | AR-4 | B | 4,5 | | 0,05 |
| Central eléctrica | 10-4-037 | B | 39 | 168 | 0,23 |
| | 10-4-038 | O | 19 | | 0,11 |
| | 10-4-037 | B | 39 | | 0,23 |
| | 10-4-038 | O | 13 | | 0,08 |
| | 10-4-037 | B | 44,3 | | 0,26 |
| | 10-4-038 | O | 60 | | 0,36 |

Nota: B= Bombeo, O= Observación.



Se analizó la información de 24 pozos (17 en Rivera y 7 en Santana do Livramento) basada, en su mayoría, en ensayos desarrollados al momento de la construcción de los pozos; los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 3. De allí puede verse que los valores de conductividad hidráulica varían entre 0,17 y 19,9 m/d, aunque la mayoría de los valores se encontraban en un rango menor a los 2 m/d. Sin embargo la Tabla no indica a qué unidad del acuífero pertenecen los resultados (es decir Rivera o Tacuarembó), pero indica que solo un valor (0,48 m/d) pertenece al acuífero somero, un valor se refiere al basalto (3,12 m/d) y la mayoría de los restantes pertenecen a la unidad del acuífero profundo. No es clara la correlación entre las zonas “somera” y “profunda” del acuífero y las formaciones Rivera/ Tacuarembó.

Tabla 3 - Valores de conductividad hidráulica según Gómez (2007)

| Pozo | T - bombeo (m ² /d) | T - recuperación (m ² /d) | Espesor de filtros, b (m) | K - bombeo (m/d) | k - Recuperación (m/d) | Capa |
|------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|---------------------|---------------------------|------|
| PT0015 | 4.32 | | 6.00 | 0.72 | | P |
| PT0021 | 19.68 | | 10.00 | 1.97 | | s/d |
| Registro 3 | | 40.53 | 35.18 | | 1.15 | P |
| AC2 | | 14.40 | 30.00 | | 0.48 | P |
| La ideal | 11.52 | | 24.00 | 0.48 | | S |
| La ideal | 36.00 | | 25.00 | 1.44 | | P |
| 10.4.031 | 87.05 | | 27.90 | 3.12 | | B |
| 10.4.033 | 6.55 | 6.55 | 39.00 | 0.17 | 0.17 | P |
| 10.4.003 | 44.52 | 74.21 | 38.65 | 1.15 | 1.92 | s/d |
| 10.4.005 | 125.45 | 74.13 | 23.76 | 5.28 | 3.12 | s/d |
| 10.4.008 | 51.84 | 46.08 | 24.00 | 2.16 | 1.92 | P |
| 10.4.011 | 7.49 | 7.49 | 24.00 | 0.31 | 0.31 | P |
| PT0007 | 57.60 | | 10.00 | 5.76 | | P |
| PT0019 | 119.52 | | 6.00 | 19.92 | | P |
| Vertedero | 16.80 | | 10.00 | 1.68 | | P |
| 10.4.026 | 3.02 | 2.38 | 9.00 | 0.34 | 0.26 | P |
| kennedy 2 | 60.48 | 82.08 | 18.00 | 3.36 | 4.56 | P |
| AL1 | 16.56 | 5.76 | 30.00 | 0.55 | 0.19 | P |
| 10.4.034 | 23.81 | | 8.00 | 2.98 | | P |
| Wilson 3 | 27.99 | 15.75 | 36.45 | 0.77 | 0.43 | P |
| AC4 | 3.60 | 8.64 | 30.00 | 0.12 | 0.29 | P |
| Prado 1 | 393.38 | 170.11 | 44.30 | 8.88 | 3.84 | P |
| 10.4.007 | 27.30 | | 24.20 | 1.13 | | s/d |
| 10.4.030 | 13.54 | | 12.00 | 1.13 | | P |

B: Basaltos - P: Profundo – S: Somero.

Gomez (2007) también incluye los resultados de la revisión bibliográfica y presenta un resumen de la información de transmisividad y coeficiente de almacenamiento obtenidos en investigaciones anteriores, e indica a qué unidades del acuífero se aplican los resultados. Esto se reprodujo en la Tabla 4 y, en la Tabla 5 los valores T se han convertido en valores K basándose en el espesor promedio de las unidades del acuífero. Se reconoce que habrá inexactitudes introducidas por el espesor asumido del acuífero, sin embargo, se consideró que esto es un enfoque razonable ya que no hay información detallada de los registros de los pozos.



Tabla 4 – Valores de transmisividad y almacenamiento citados por Gómez, 2008

| Formación | Fuente | T (m ² /d) | S |
|------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Rivera | Montaño y Pessi (1985) | 139 - 151 | |
| | Montaño et al. (1998) | 140 - 155 | |
| | Pessi y Ardí (1998) | 242 - 300 | 2,5 x 10 ⁻⁴ |
| | Pacheco (2004) | 147 | |
| Tacuarembó | Montaño y Pessi | 27 - 57 | |
| | Montaño et al. (1998) | 25 | |
| | Pessi y Ardí (1998) | 70 – 120 | 0,5 - 1,5 x 10 ⁻³ |
| | Pacheco (2004) | 60 | |

De la Tabla 5 se puede ver que, como se supuso generalmente, la formación Rivera es más permeable que la formación Tacuarembó subyacente.

Tabla 5 – Rango de valores de conductividad hidráulica basados en estudios previos

| Formación | Valor | Transmisividad (m ² /d) | Espesor del acuífero (m) | Conductividad hidráulica (m/d) |
|------------|-------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Rivera | Alto | 300 | 60 | 5 |
| | Medio | 219,5 | | 3,6 |
| | Bajo | 139 | | 2,3 |
| Tacuarembó | Alto | 120 | 100 | 1,2 |
| | Medio | 72,5 | | 0,7 |
| | Bajo | 25 | | 0,25 |



Con fines comparativos, en la Tabla 6 se presentan los resultados del trabajo de Oleaga & De los Santos (2003), principalmente en el área de los pozos termales ubicados a más o menos 250 km o más hacia el oeste del área del presente estudio.

Tabla 6 – Valores de transmisividad según Oleaga y De Los Santos

| Pozo | Transmisividad m²/d | Conductividad Hidráulica m/d |
|-----------------------------|---|---|
| Hotel Quiroga | 141 | 0,7 |
| OSE | 70, 112, 114, 111 | 0,35; 0,6; 0,6; 0,6 |
| Posada del Siglo XIX | 130 | 0,65 |
| Daymán | 82, 67, 89-90 | 0,4; 0,3; 0,45; 0,45 |
| Kanarek | 115 | 0,6 |
| Rango para el área de Salto | 67 - 141 | 0,35; 0,7 |

Collazo et al (2005) analizan el acuífero en el área de estudio y describen a la formación Rivera como no confinada o libre, y a la Tacuarembó como no confinada en la parte superior y como semi-confinada en la parte inferior. Ellos también presentan una tabla resumiendo los resultados de los ensayos hidráulicos en siete pozos pertenecientes a OSE, los cuales se llevaron a cabo cuando se construyeron los pozos. Dicha tabla se reproduce en la Tabla 7 de este informe, donde se presentan también los valores de conductividades hidráulicas basados en espesores promedio del acuífero. En la Tabla 8 se resume la información de la Tabla 7 en relación a las unidades del acuífero y al rango de valores registrado.



Tabla 7 – Parámetros del acuífero según diferentes Autores

| Autores | Pozo | Profundidad (m) | Unidad Hidrogeológica | T (m²/d) | S | Espesor promedio del acuífero (m) | K (m/d) |
|----------------------|--------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------|--|----------------|
| Hardi & Pessi (1995) | OSE 10.4.005 | | Rivera - Tacuarembó | 169 | 0,027 | 160 | 1,1 |
| Hardi & Pessi (1995) | OSE 10.4.007 | | Tacuarembó | 70-120 | 0,0015 -0,5 | 100 | 0,7–1,2 |
| Hardi & Pessi (1995) | OSE 10.4.016 | 70 | Rivera | 242 a 300 | 0,00025 | 60 | 4 - 5 |
| Montaño et al (1998) | OSE 724/1 | 84.5 | Rivera - Tacuarembó | 155 | 0,001 | 160 | 1 |
| Montaño et al (1998) | OSE 1161 | 51.3 | Rivera | 140 | 0,001 | 60 | 2,3 |
| Montaño et al (1998) | OSE 961/1 | 102.5 | Rivera | 151 | | 60 | 2,5 |
| Pérez & Rocha (2001) | OSE 10.4.034 | 53 | Tacuarembó | 37,5 | 0,005 | 100 | 0,4 |

Según lo informado por Collazo et al (2007) con los valores k agregados

Tabla 8 – Resumen de valores de conductividad hidráulica por unidad (Con base en datos de la Tabla 7)

| Unidad del acuífero | Conductividad Hidráulica (m/d) | | |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------|-------------|
| | Baja | Media | Alta |
| Rivera | 2,3 | 3,65 | 5 |
| Tacuarembó | 0,4 | 0,8 | 1,2 |

Las Tablas 4 y 7 contienen mucha información similar, sin embargo, la Tabla 7 presenta los pozos a los cuales se aplica la información.



Collazo et al (2005) concluyen que la conductividad hidráulica promedio de la formación Rivera es de 2,7 m/d y de formación Tacuarembó es de 1,4 m/d.

En comparación, Gómez (2007) indica que los valores de conductividad hidráulica para el sector profundo tenían un promedio de 1,5 m/d, con un máximo de 5,76 m/d y un mínimo de 0,12 m/d. Con relación al basalto y al área somera de las areniscas, solo se obtuvo un valor para cada uno y estos fueron de 0,48 m/d y 3,12 m/d respectivamente.

Almacenamiento

Se pueden asignar coeficientes de almacenamiento al modelo para representar las condiciones de confinamiento y no confinamiento. En el caso de los ensayos hidráulicos desarrollados dentro del presente estudio los coeficientes de almacenamiento calculados variaron entre $2,08 \times 10^{-4}$ y $1,99 \times 10^{-1}$. El valor inferior de almacenamiento indica condiciones de confinamiento y el valor más alto está dentro del rango de los valores esperados para un acuífero de areniscas no confinadas.

En el trabajo previo citado por Gomez (2007) los coeficientes de almacenamiento calculados variaron entre $2,5 \times 10^{-4}$ y 0,5, siendo éste último un valor excepcionalmente alto.

Collazo et al (2005) presenta varios valores de almacenamiento o porosidad efectiva. En los resultados de los ensayos hidráulicos de los pozos de OSE, presentados en la Tabla 7, el coeficiente de almacenamiento para la formación Rivera varía entre $2,4 \times 10^{-4}$ y 1×10^{-3} , los cuales son más típicos de condiciones de confinamiento que de no confinamiento, y los valores para Tacuarembó están entre 1×10^{-3} y 0,5, que, como se señaló anteriormente, es un valor excepcionalmente elevado.

Collazo et al también presentó los ensayos de laboratorio en varias muestras de las dos unidades del acuífero, para determinar la porosidad efectiva. El informe menciona que la porosidad efectiva para la formación Rivera varió entre 6 y 25%, con un valor medio de 14% y para la formación Tacuarembó varió entre 0,9 y 18%, con un valor medio de 9%. Aunque existen diferencias técnicas, en el caso de un acuífero libre se puede considerar a la porosidad efectiva como equivalente a la porosidad eficaz o al almacenamiento efectivo.

2.5 Recarga

La recarga es un parámetro importante en el estudio del acuífero, ya que define el límite superior para el cálculo de la cantidad de agua disponible que se puede extraer sin llegar al agotamiento del recurso, una situación que a veces se denomina sobreexplotación de aguas



subterráneas. Sin embargo, esto no es cierto, ya que no toma en cuenta el comportamiento necesario para mantener flujo bajo en los ríos y arroyos, ni la recarga necesaria para mantener los gradientes hidráulicos y por lo tanto el flujo de agua en el acuífero. Por lo tanto, la recarga define solamente un límite superior de abstracción de agua subterránea y por lo que puede decirse dicha recarga debe ser mayor que la abstracción.

En el área de estudio actual ha habido una cantidad de intentos anteriores de calcular la tasa de recarga, por ejemplo Montañó y Carrión (1990), quienes asumieron una tasa de infiltración del 3% de la precipitación, o Silva Busso (1999), quien asumió un valor de 3,5% de la precipitación como cita Gómez (2007). Otros autores se han aventurado a esto y, como lo mencionó Gomez (2007), generalmente asumieron valores de 3 a 5% de la precipitación. Sin embargo, como parte de una tesis para una Maestría, Gomez emprendió una evaluación más exhaustiva de la recarga en el área de estudio, y llegó a un valor de 47 mm/a para las áreas de basalto y 152 mm/a para la arenisca, representando este último valor el 9,3% de la precipitación anual. En el proceso de calibración del modelo estos números se ajustaron a 22 mm y 157 mm por año para el basalto y la arenisca, respectivamente.



3.0 EL MODELO NUMÉRICO

3.1 Dominio del Modelo

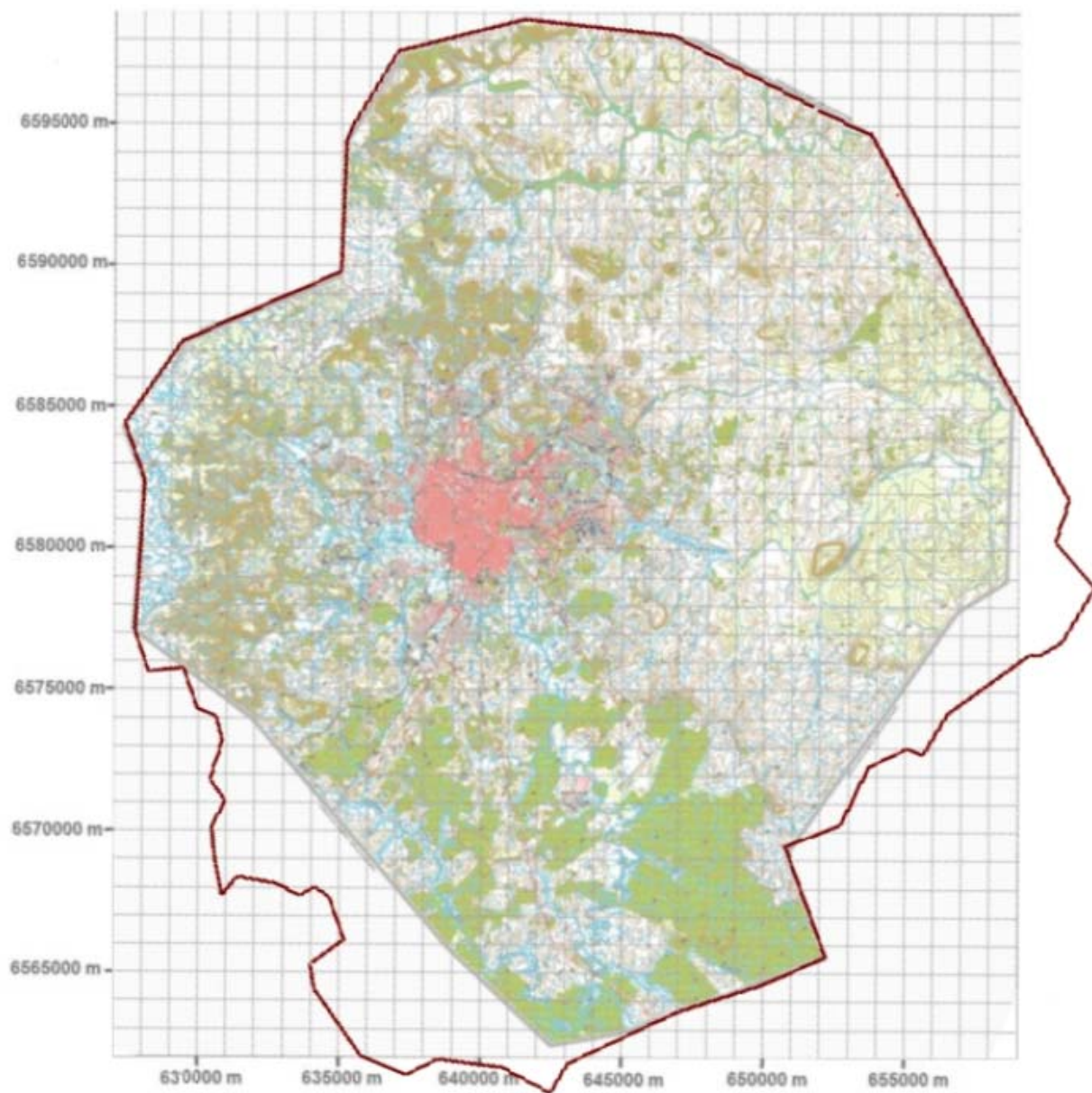
El paso inicial en el ejercicio de modelación es el de determinar el tamaño del dominio del modelo, haciendo énfasis en la selección de los bordes apropiados para el mismo. Por lo general, el tamaño del modelo es mayor que el área primaria de estudio, con el fin de poder tratar el asunto de las condiciones de borde.

La selección de las condiciones de bordes apropiadas es crítica para el desarrollo de un modelo exacto y, donde sea posible, es preferible utilizar características físicas naturales. Los bordes hidrológicos naturales que limitan el sistema de flujo incluyen las divisorias geológicas, las de aguas superficiales y las de aguas subterráneas.

El área piloto Rivera-Livramento es un área sub-redondeada de alrededor de 750 kilómetros cuadrados, que se extiende desde la longitud E627000 a la E659000, y desde la latitud N6562000 a la N6599000. Por esto, se seleccionó el dominio del modelo midiendo desde las coordenadas E 627000 N 6560345 en la esquina suroeste, hasta las coordenadas E 662236 N 6599000 en la esquina noreste y midiendo aproximadamente 35 por 38,6 km. En la Figura 5 se muestra el dominio del modelo sobrepuesto en el mapa base del área piloto.

En lo posible, los bordes se seleccionaron con base en las características hidrogeológicas naturales y se analizan en profundidad en la sección 3.6.

Además de los bordes laterales, fue necesario definir los bordes superiores e inferiores del modelo. Como se hace generalmente, se seleccionó la superficie del suelo como el borde superior del modelo, y el techo del basamento Precámbrico pareció ser la superficie más apropiada para el borde inferior. Esto marca el límite inferior de la sucesión sedimentaria y el límite superior de las rocas cristalinas subyacentes, que se asume son relativamente impermeables en comparación con el Acuífero Guaraní. También se le considera como el límite inferior del movimiento activo de agua subterránea.



Dominio del Modelo

Figura 5 - Dominio del Modelo



**SNC-LAVALIN
International**

**Charlesworth
& Associates**
CONSULTING HYDROGEOLOGISTS



3.2 La cuadrícula del Modelo

Como se mencionó anteriormente, el enfoque de diferencias finitas utilizado en el programa MODFLOW involucra la definición del área a ser modelada como una serie de celdas que están alineadas en filas y columnas, y que el arreglo de celdas constituye la cuadrícula del modelo. Los nodos creados por esta cuadrícula bidimensional pueden ser cuadrados o rectangulares.

La selección del espaciamiento nodal es de extrema importancia pero la ventaja con el Visual MODFLOW es que el espaciamiento nodal se puede ajustar durante el

proceso de modelación agregando filas y columnas adicionales cuando sea necesario.

La cuadrícula inicial utilizada en el modelo fue de 252 filas por 227 columnas, con un espaciamiento uniforme de la cuadrícula de 150 m dentro del área piloto, lo que dio como resultado 6.745 celdas activas en el basalto y 38.268 celdas activas en las otras capas. Se seleccionó la orientación de la cuadrícula del modelo para que diera el mejor ajuste con los sentidos de flujo de agua subterránea dentro del área urbana principal, donde se ubican los pozos. La figura 6 muestra la cuadrícula del modelo en régimen permanente.

Posteriormente, durante la validación del modelo en régimen transitorio, el espaciamiento de la cuadrícula de 150 m se redujo en las cercanías de los pozos de extracción, dando como resultado 273 filas, 273 columnas y 48.232 celdas activas.



Figura 6 - Cuadrícula del Modelo en régimen permanente



3.3 Las Capas del Modelo

Con la adición posterior de capas en el sentido vertical, los nodos bidimensionales definidos por la cuadrícula se convirtieron en cubos o bloques tridimensionales. La cuadrícula horizontal debe ser la misma para cada capa. La selección de las capas del modelo generalmente corresponde a las unidades hidroestratigráficas aunque, aún en los casos simples, se ha demostrado que al subdividir a una unidad simple del acuífero en diferentes capas idénticas se puede tener una simulación mejorada del movimiento vertical y facilitar la convergencia del modelo.

Las superficies derivadas del modelo conceptual son el punto de partida para la construcción de las capas del modelo. Estas son:

- Piso del basalto/techo de la arenisca
- Piso de la arenisca (incluyendo la Buena Vista)
- Piso del Pérmico/techo del Precámbrico

Como se muestra en la Figura 7 estas tres superficies fueron el ingreso inicial al modelo y definieron las siguientes unidades hidroestratigráficas:

- Unidad 1 – Formación Serra Geral (Arapey) – acuífero/ acuitardo
- Unidad 2 – Las formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista – es decir el Acuífero Guaraní
- Unidad 3 – los depósitos Pérmicos – es decir acuitardo y unidades de baja producción del acuífero (excluyendo la parte inferior de la formación Buena Vista, que probablemente es de la era Pérmica superior)
- Unidad 4 – El Precámbrico – es decir el acuíclodo subyacente (no es una parte activa del modelo)

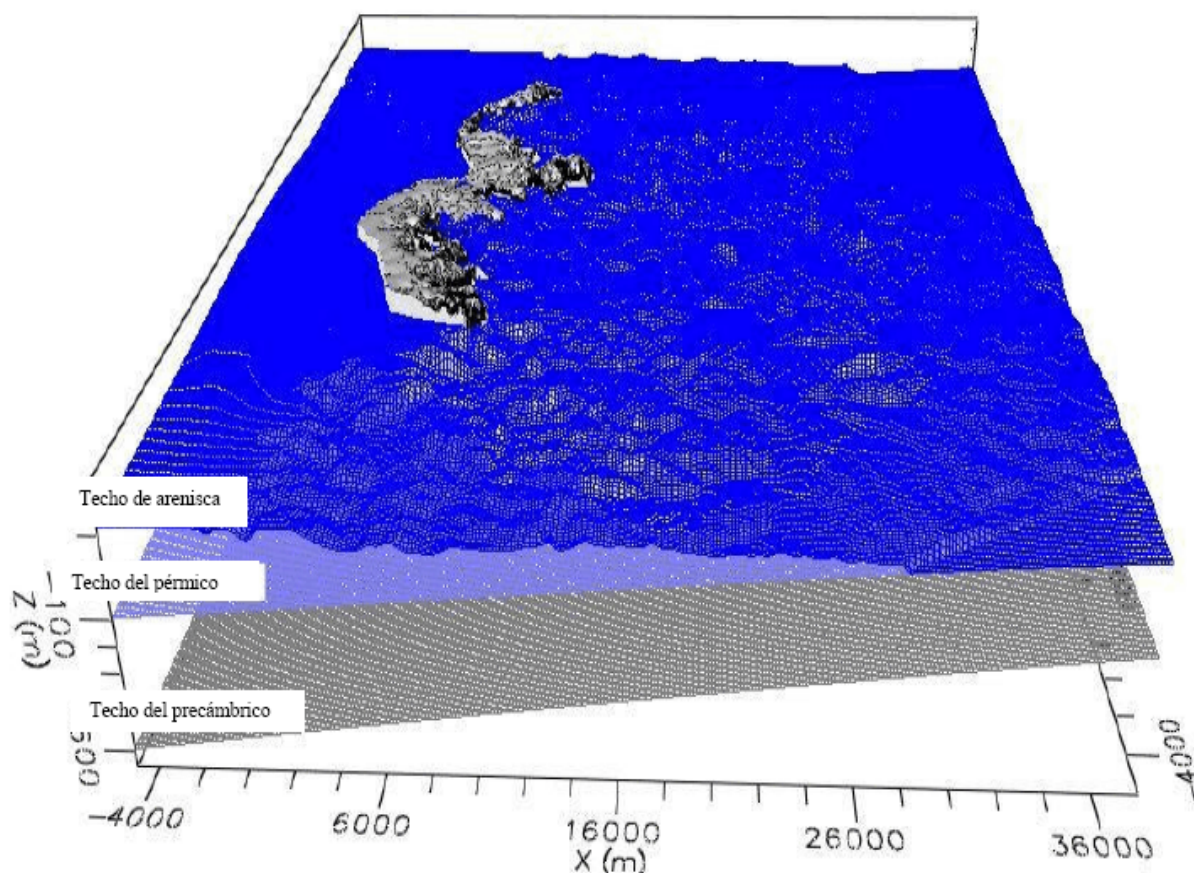


Figura 7 - Superficies iniciales del Modelo



A partir de la información disponible del pozo no fue posible distinguir satisfactoriamente entre las tres unidades del Sistema Acuífero Guaraní, sin embargo, con base en la revisión bibliográfica, se nota que se dice que la formación Rivera tiene un espesor de 65 m en el área de recarga, comparada con las formaciones Tacuarembó y Buena Vista, que se dice tienen 100 m de espesor cada una (Collazo et al, 2005). Esta información se utilizó para dividir al SAG dentro del modelo. Esto se comparó luego con el mapa geológico disponible, el cual está a escala regional (Bossi et al, 1998), y muestra los afloramientos de las diferentes unidades dentro del área piloto y la región que la rodea. De esto se confirmó que los espesores asumidos de las unidades del acuífero eran razonables. Estas unidades hidroestratigráficas, como entraron al modelo, se presentan en una vista tridimensional en la Figura 8 y en la sección transversal en la Figura 9. La ubicación de la sección transversal se muestra en la Figura 9.

El modelo se armó con 7 capas para permitir la flexibilidad al asignar parámetros y, en la configuración final la Capa 1 es el basalto, que solo ocupa 152 km² aproximadamente, o cerca del 17% del dominio del modelo.

La Capa 2 es la formación Rivera y las Capas 3 y 4 del modelo se asignaron a la formación Tacuarembó. La formación Buena Vista, que subyace a la formación Tacuarembó y para los propósitos de la modelación se la considera parte del SAG, está representada por las Capas 5 y 6 y los depósitos Pérmicos subyacentes son la Capa 7. Se considera que el techo del Precámbrico es un borde impermeable.

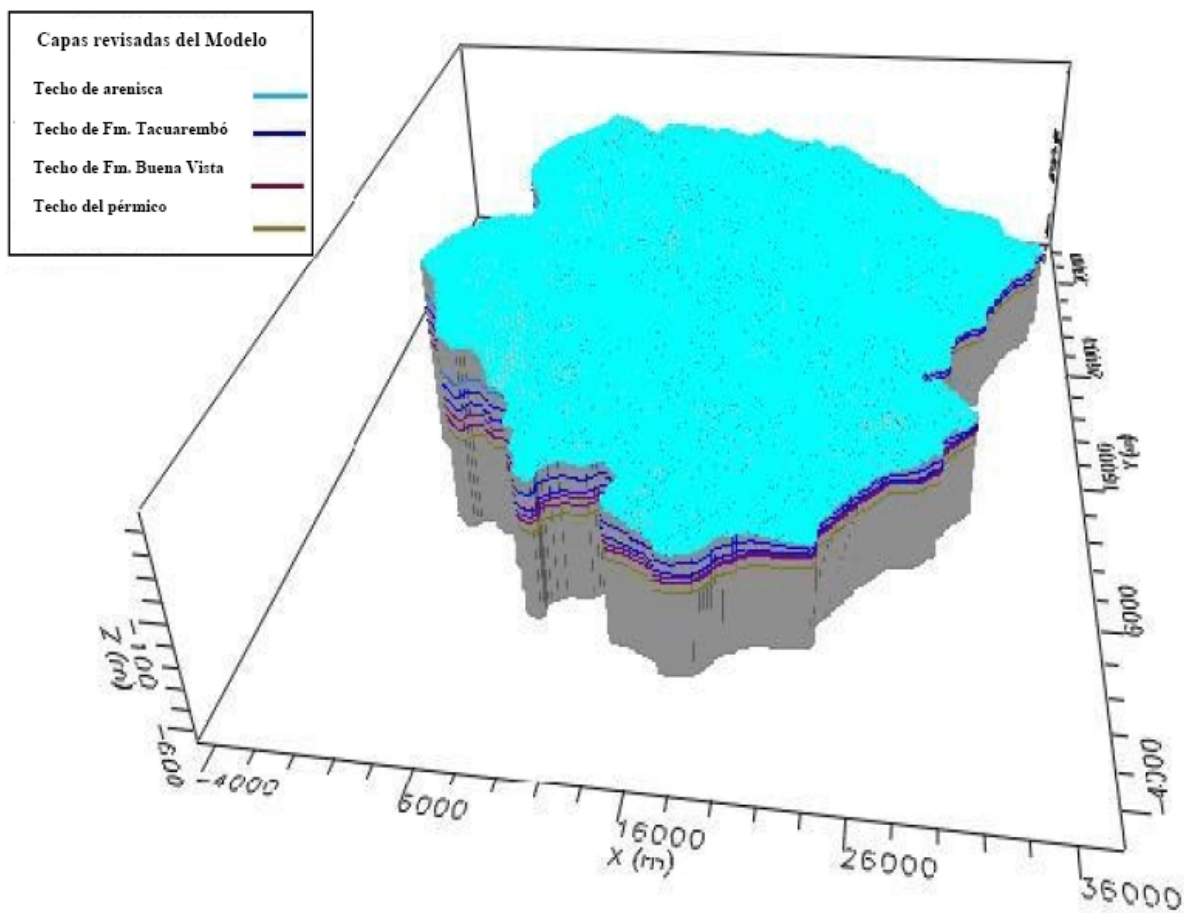


Figura 8 – Unidades hidroestratigráficas del Modelo



**SNC-LAVALIN
International**





Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní

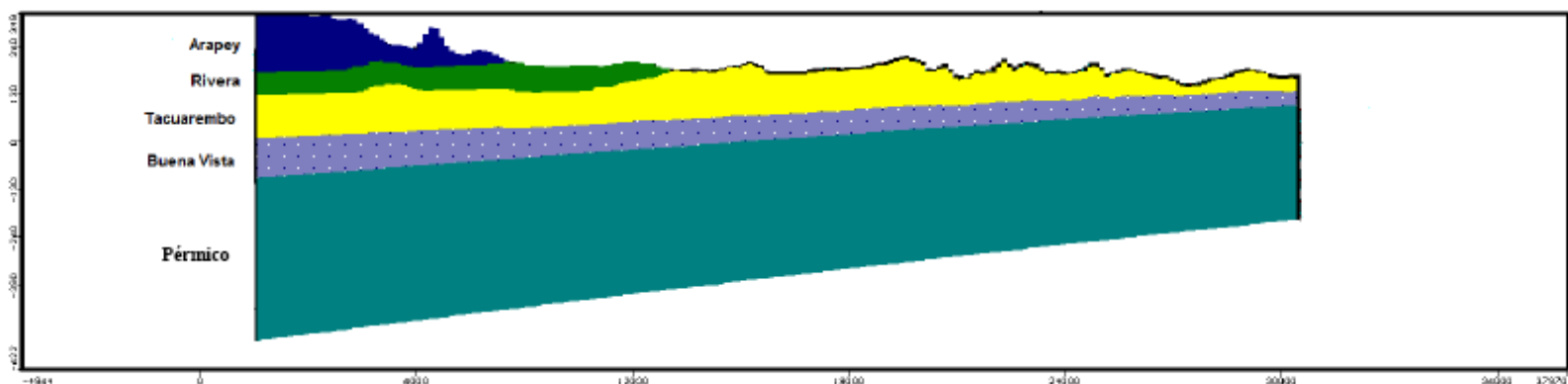


Figura 9- Sección transversal que muestra las capas hidroestratigráficas del Modelo Pérmico





3.4 Conductividad hidráulica

Con base en una revisión de la información presentada en la sección 2.4, se ingresaron al modelo varios valores de conductividades hidráulicas y se ajustaron para obtener la mejor adaptación. La Tabla 9 muestra los valores finales que se obtuvieron en el modelo calibrado en régimen de estado permanente. En el caso de la formación Rivera un valor regional de 2,7, que es el valor dado por Collazo et al, arrojó una buena calibración. En la calibración final hubo algunas áreas pequeñas donde se ajustó el valor k. En estas áreas puntuales el valor varió entre un mínimo de 0,1 m/d y un máximo de 6 m/d.

Tabla 9 – Unidades Hidroestratigráficas

| Unidad geológica | Espesor (m) | Conductividad hidráulica (m/d) | Función |
|--|-----------------|--------------------------------|---|
| Basalto | 0 - 200 | $K_h = 0,1$ $K_v = 1,0$ | Acuífero – local Acuitardo -regional |
| Formación Rivera | 0 - 65 | $K_h = 2,7$ $K_v = 0,27$ | Acuífero Guaraní principal |
| Formación Tacuarembó | 20 - 100 | $K_h = 1,99$ $K_v = 0,199$ | |
| Triásico y pérmico superior (Buena Vista y/o equivalente) | 40 - 120 | $K_h = 1,0$ $K_v = 0,1$ | Unidad asociada del acuífero |
| Pérmico medio e inferior | 400 | $K_h = 0,01$ $K_v = 0,001$ | Acuitardo |
| Precámbrico | - | | Acuicludo |

Para la formación Tacuarembó se utilizó una conductividad hidráulica de 1,99 m/d en el modelo calibrado y 1,0 m/d para la formación Buena Vista subyacente.

A los sedimentos Paleozoicos del acuitardo (Capa 7 en el modelo) se les asignó un valor de conductividad hidráulica de 0,01 m/d. En todas las capas, excepto en el basalto, se asumió que la conductividad hidráulica vertical era un 10% de la horizontal, es decir $K_v = 0,1K_h$. En el caso del basalto los mejores resultados se obtuvieron cuando la conductividad hidráulica vertical era

10 veces mayor a la horizontal, donde la horizontal era de 0,1 m/d.



3.5 Niveles de agua y cargas hidráulicas

El punto de partida para el modelo fue el mapa de curvas piezométricas preparado por SNC-Lavalin y que se incluye como Figura 4 en este informe. Con fines de calibración se utilizaron los niveles de agua casi-estáticos de 106 pozos aproximadamente, la mayoría de los cuales también se utilizaron como información de ingreso para el mapa piezométrico.

3.6 Condiciones de borde

Donde fue posible se seleccionaron bordes naturales, tales como ríos o divisorias de agua, para el modelo de Rivera-Livramento. La Figura 10 presenta los diferentes tipos de bordes utilizados en el modelo. En el área más alta, a lo largo de la parte norte del margen occidental del área piloto, se asignó un borde de carga constante. El borde norte del modelo se estableció como un borde sin flujo, y el borde noreste como un borde de carga constante. El borde sureste del modelo se definió por un río (Río D), al igual que el borde suroeste (Del Farrapo). Dos tramos cortos del borde sur se establecieron como bordes sin flujo.

3.7 Ríos

En el modelo se incluyeron varias otras corrientes y/o ríos, además de aquellos utilizados para especificar las condiciones de borde; estas corrientes y ríos se presentan en la Figura 10. En el MODFLOW, todas las opciones para simular las condiciones de borde también pueden utilizarse en el interior del dominio del modelo para simular fuentes y sumideros de agua o bordes internos. En el caso de las diferentes corrientes y ríos se asumió que el nivel del río se encuentra al nivel de la superficie del suelo, y la elevación se obtuvo del mapa digital de topografía. El fondo del río se estableció a 1,0 m debajo del nivel del río; las conductancias del río se establecieron en lo que se creyó era un valor razonable basado en los cálculos de la longitud del río en las celdas del modelo, el ancho del río y un estimativo de 0,5 m de espesor del lecho del río. Este es el procedimiento normal para celdas de río, a menos que haya información previa. Los valores de conductancias se ajustaron durante la calibración y oscilaron entre 0,5 y 100 m³/d/m.

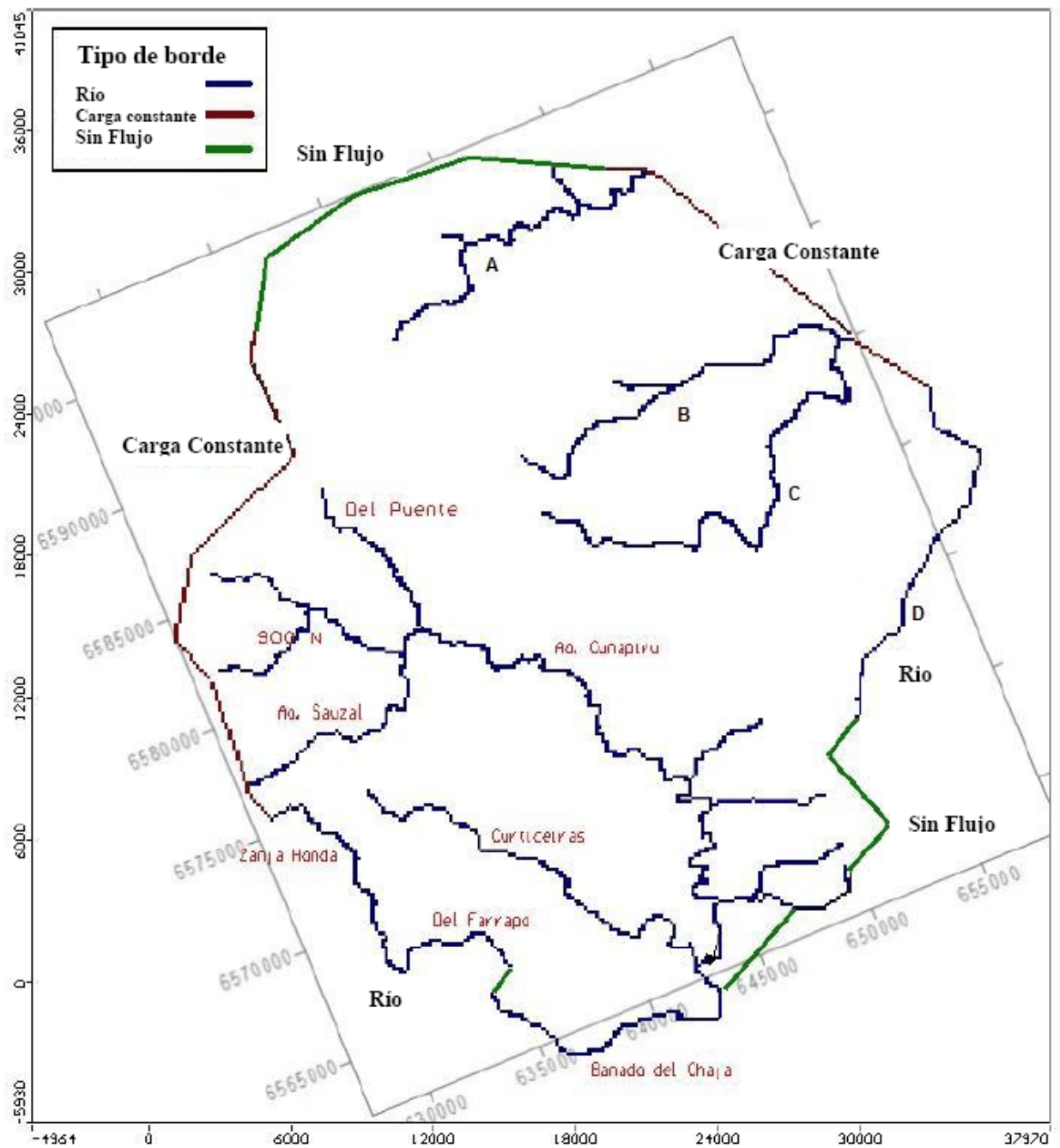


Figura 10 - Condiciones de borde del Modelo



3.8 Extracción de agua subterránea

Con base en la información disponible, las tasas de extracción presentadas en la Tabla 10 fueron ingresadas al modelo. En la Figura 11 se muestra la ubicación de los pozos de bombeo.

3.9 Coeficiente de Almacenamiento

En el modelo se usó un valor de $1E-5$ m⁻¹ para almacenamiento específico en áreas confinadas y un 0,15 para coeficiente de desagüe (coeficiente de almacenamiento específico) en áreas no confinadas.

Tabla 10 – Caudales de bombeo de los pozos

| Identificación del pozo | X | Y | Q (m ³ /d) | Identificación del pozo | X | Y | Q (m ³ /d) |
|-------------------------|----------|---------|-----------------------|-------------------------|----------|---------|-----------------------|
| 10.4.015 | 638795,7 | 6576267 | 132 | 10.4.019 | 640990,9 | 6579668 | 132 |
| Sagr-69 | 635322,9 | 6578586 | 24 | 10.4.022 | 641730,7 | 6579660 | 30 |
| Sagr-48 | 633344,5 | 6576858 | 144 | 10.4.016 | 633000,5 | 6583911 | 1440 |
| Sagr-41 | 633649,5 | 6572685 | 480 | 10.4.020 | 638251,4 | 6577644 | 6 |
| Sagr-40 | 635165,9 | 6574219 | 12 | 10.4.027 | 637800,9 | 6576890 | 270 |
| Sagr-39 | 635479,8 | 6575515 | 144 | 10.4.028 | 641139,7 | 6579779 | 230 |
| Sagr-36 | 636160 | 6578327 | 168 | 10.4.029 | 642280,7 | 6579758 | 322 |
| Sagr-35 | 636252,4 | 6578546 | 168 | 10.4.030 | 638823,9 | 6577110 | 269 |
| Sagr-34 | 639874,4 | 6579707 | 96 | 10.4.031 | 638167,4 | 6583521 | 720 |
| Sagr-64 | 640236,6 | 6566925 | 54 | 10.4.034 | 639593,1 | 6577348 | 297 |
| Sagr-16 | 635008,1 | 6570711 | 43 | 10.4.033 | 641933,6 | 6580117 | 600 |
| Sagr-14 | 638546,4 | 6571522 | 384 | AC1 | 644977,5 | 6583481 | 1440 |
| Sagr-9 | 638706,1 | 6576130 | 122 | BR2 | 643164,1 | 6583218 | 960 |
| 10.4.026 | 641965 | 6580066 | 48 | RE2 | 639106,4 | 6584721 | 1920 |
| 1368-2 | 638498,9 | 6576391 | 43 | H11 | 641083 | 6580889 | 960 |
| 1367-2 | 638736,4 | 6577742 | 9 | AR3 | 643879,5 | 6580587 | 960 |
| 10.4.009 | 639033,7 | 6576591 | 105 | SantaRita | 637790,3 | 6587488 | 888 |
| 10.4.025 | 634037,3 | 6583329 | 446 | 1041 | 643344,2 | 6579624 | 1118 |
| 10.4.018 | 633824,9 | 6583666 | 377 | AC4 | 639570,1 | 6582091 | 1800 |
| 10.4.017 | 633415,5 | 6583241 | 780 | VilaLuiza | 642298 | 6580441 | 960 |
| 10.4.023 | 634279,7 | 6584165 | 936 | W1 | 643893,6 | 6583482 | 360 |
| RE3 | 638997,5 | 6584603 | 2400 | Ke1 | 641903 | 6583032 | 720 |
| Prado1 | 639272,5 | 6584210 | 3120 | Ar4 | 643848 | 6580461 | 1560 |
| 724-2 | 637714,3 | 6582556 | 540 | Ar5 | 643727,9 | 6580902 | 840 |
| PT0005 | 640599 | 6575975 | 101 | BR3 | 643358,6 | 6583011 | 960 |



| Identificación del pozo | X | Y | Q (m ³ /d) | Identificación del pozo | X | Y | Q (m ³ /d) |
|-------------------------|----------|---------|-----------------------|-------------------------|----------|---------|-----------------------|
| PT0007 | 641395,2 | 6579144 | 240 | BR4 | 642757,7 | 6583296 | 1560 |
| Laideal | 639578,1 | 6579909 | 86 | RE1 | 638898,5 | 6584541 | 1440 |
| MontePaz | 638523,9 | 6574024 | 144 | AC3 | 639623,2 | 6582192 | 1440 |
| 10.4.007 | 633332,7 | 6583939 | 864 | H2 | 640682,8 | 6580676 | 1920 |
| 10.4.036 | 633375,8 | 6583298 | 344 | H3 | 640273,3 | 6580996 | 720 |
| Lavadero | 640218,6 | 6580265 | 142 | H4 | 640737,8 | 6580491 | 960 |
| Vertedero | 640204,5 | 6576419 | 168 | H5 | 640973,4 | 6581206 | 2160 |
| AC2 | 639322,7 | 6582150 | 480 | H6 | 640732,9 | 6580591 | 960 |
| Sagr-12 | 640660 | 6570020 | 144 | h7 | 640661,9 | 6580592 | 1200 |
| Sagr-19 | 634197,3 | 6571559 | 360 | Lta1 | 640348,6 | 6582051 | 840 |
| Sagr-15 | 640531,9 | 6570201 | 120 | ltc1 | 640118,7 | 6581961 | 960 |
| Sagr-17 | 634775,5 | 6568613 | 360 | cce3 | 644788,2 | 6581781 | 1440 |
| Sagr-44 | 643312,9 | 6576565 | 144 | lta2 | 640298,3 | 6582091 | 768 |
| Sagr-45 | 644105,3 | 6576112 | 60 | cce5 | 644158,4 | 6582071 | 720 |
| Sagr-57 | 636631,8 | 6568293 | 144 | prg1 | 642188,3 | 6583161 | 360 |
| Sagr-38 | 639044,1 | 6580596 | 106 | cce6 | 644352 | 6581982 | 960 |
| VilaUmb | 641093,5 | 6580833 | 363 | ar2 | 644023,2 | 6580841 | 2376 |
| AL1 | 644971,5 | 6583485 | 960 | jf1 | 637858,6 | 6584171 | 36 |
| Wilson3 | 644098,8 | 6584499 | 960 | apm1 | 638338 | 6585331 | 72 |
| SimonBolivar | 642775,7 | 6585219 | 480 | ct1 | 642198 | 6583221 | 96 |
| Ke2 | 642052,6 | 6583200 | 1680 | jl1 | 642858,2 | 6585482 | 36 |
| Br1 | 643345,7 | 6583091 | 1200 | cf1 | 638647,9 | 6585412 | 120 |
| H10 | 641068,5 | 6581018 | 1200 | lb1 | 642018,6 | 6585512 | 24 |
| JardimdoVerde | 642054,1 | 6580813 | 1440 | fjm1 | 638198,7 | 6585662 | 36 |
| 724-1 | 637808,1 | 6582074 | 859 | rds1 | 641938,4 | 6585491 | 72 |
| 1226-5 | 638710,5 | 6581654 | 336 | hm1 | 643468,5 | 6585231 | 158 |
| 1226-6 | 638921,8 | 6579449 | 120 | pp1 | 647247,8 | 6585536 | 144 |
| 10.4.001 | 636542,4 | 6582732 | 406 | em1 | 638228,6 | 6584541 | 29 |
| 10.4.002 | 635808,9 | 6583002 | 259 | jm1 | 644057,8 | 6584057 | 96 |
| 10.4.003 | 637792,6 | 6582091 | 1350 | cidade | 643859,9 | 6584807 | 36 |
| 10.4.004 | 639816,3 | 6580160 | 528 | psj1 | 638698,1 | 6581992 | 101 |
| 10.4.005 | 637906,2 | 6583009 | 1099 | al2 | 645347,7 | 6583321 | 202 |
| 10.4.008 | 638682,6 | 6579527 | 161 | 7rcmec1 | 640698,3 | 6582861 | 214 |
| 10.4.011 | 637167,9 | 6581396 | 696 | cce7 | 644198,3 | 6581592 | 1440 |
| 10.4.012 | 637877,4 | 6577735 | 60 | scs2 | 638247,7 | 6584551 | 240 |
| 10.4.021 | 635895,7 | 6577526 | 84 | Sagr-8 | 639333,7 | 6576843 | 240 |
| 1508-6 | 639086,8 | 6576761 | 79 | Sagr-13 | 638425,7 | 6571454 | 156 |

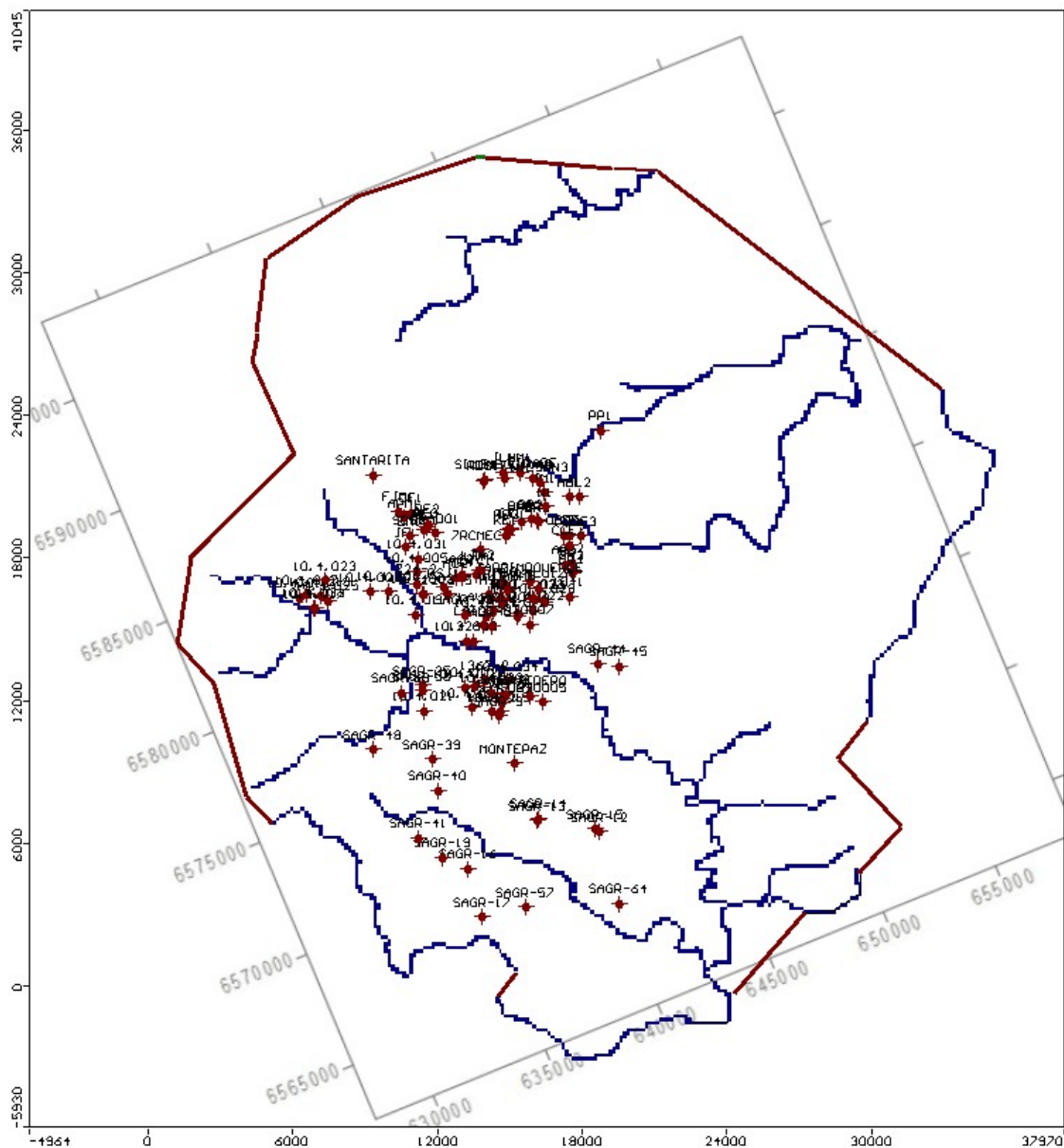


Figura 11 - Ubicación de pozos de bombeo



SNC-LAVALIN
International





4.0 CALIBRACIÓN DEL MODELO

4.1 Modelación en régimen permanente

El modelo en régimen permanente se ejecutó por 15000 días y se obtuvo la calibración del modelo por medio del procedimiento de prueba y error, al comparar las cargas hidráulicas simuladas con las cargas observadas en los pozos.

Se hicieron numerosas ejecuciones con valores diferentes para varios parámetros, tales como conductividad hidráulica, recarga, conductancia del lecho de los ríos y con ajustes en las cargas de los bordes. Los niveles de agua calculados que corresponden a los pozos de observación se compararon con los niveles de agua medidos en esos pozos y se utilizaron como base de datos para la calibración del dominio total del modelo. En la Figura 12 se observa la ubicación de los pozos de observación.

Se obtuvo una calibración aceptable con error normalizado de raíz media cuadrada (RMC) de 10,9, el cual se aproxima al “estándar de la industria” de menos de 10 % como se muestra en la Figura 13. En este modelo el máximo residual, es decir la diferencia entre los niveles de agua observados y calculados, fue de 18,6 m.

La Tabla 11 presenta la comparación entre las cargas calculadas y observadas, es decir los niveles de agua, en los pozos y los valores residuales.



Tabla 11 – Comparación de los Niveles de Agua Observados y Calculados

| IDENTIFICACIÓN DEL POZO (ID) | h (Obs.) msnm | h (Cal.) msnm | Residual msnm | IDENTIFICACIÓN DEL POZO (ID) | h (Obs.) msnm | h (Cal.) m | Residual m |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| 10 | 173,40 | 164,49 | -8,91 | 52 | 185,00 | 190,63 | 5,63 |
| 10-4-037-PT | 201,05 | 211,34 | 10,29 | 54 | 201,00 | 192,77 | -8,23 |
| 10-4-038-PT | 206,91 | 212,11 | 5,20 | 55 | 183,00 | 172,93 | -10,07 |
| 101 | 183,00 | 171,39 | -11,61 | 57 | 175,00 | 172,32 | -2,68 |
| 102 | 181,70 | 166,79 | -14,91 | 58 | 172,00 | 167,05 | -4,95 |
| 103 | 158,00 | 167,69 | 9,69 | 59 | 171,00 | 172,55 | 1,55 |
| 104 | 180,00 | 175,33 | -4,67 | 60 | 172,00 | 174,72 | 2,72 |
| 105 | 183,00 | 175,34 | -7,66 | 61 | 186,00 | 177,31 | -8,69 |
| 107 | 174,00 | 169,90 | -4,10 | 62 | 173,00 | 178,20 | 5,20 |
| 11 | 176,60 | 160,95 | -15,65 | 63 | 174,00 | 168,63 | -5,37 |
| 110 | 147,00 | 160,39 | 13,39 | 64 | 166,00 | 168,28 | 2,28 |
| 111 | 161,00 | 169,26 | 8,26 | 65 | 171,00 | 165,89 | -5,11 |
| 112 | 185,00 | 183,73 | -1,27 | 67 | 178,00 | 164,22 | -13,78 |
| 113 | 184,00 | 183,33 | -0,67 | 68 | 154,00 | 163,62 | 9,62 |
| 114 | 189,00 | 178,63 | -10,37 | 69 | 183,00 | 164,51 | -18,49 |
| 116 | 177,00 | 170,33 | -6,67 | 72 | 160,15 | 162,55 | 2,40 |
| 119 | 167,00 | 167,92 | 0,92 | 73 | 179,00 | 168,45 | -10,55 |
| 12 | 156,58 | 164,78 | 8,20 | 7352 | 198,00 | 197,18 | -0,82 |
| 120 | 166,00 | 158,50 | -7,50 | 7353 | 201,00 | 201,08 | 0,08 |
| 121 | 181,00 | 162,12 | -18,88 | 7354 | 205,55 | 205,28 | -0,27 |
| 123 | 163,00 | 162,71 | -0,29 | 7355 | 208,00 | 205,62 | -2,38 |
| 17 | 157,90 | 173,95 | 16,05 | 7356 | 207,00 | 205,42 | -1,58 |
| 20120 | 208,00 | 206,05 | -1,95 | 7361 | 210,00 | 198,64 | -11,36 |
| 20122 | 189,30 | 173,97 | -15,33 | 7362 | 190,00 | 199,99 | 9,99 |
| 20123 | 192,55 | 188,19 | -4,36 | 7365 | 203,00 | 201,82 | -1,18 |
| 20125 | 190,70 | 193,61 | 2,91 | 7367 | 180,58 | 177,11 | -3,47 |
| 20126 | 201,00 | 204,08 | 3,08 | 7370 | 205,00 | 207,08 | 2,08 |
| 21 | 181,00 | 177,68 | -3,32 | 7447 | 201,35 | 189,59 | -11,76 |
| 22 | 193,00 | 192,10 | -0,90 | 7449 | 219,00 | 207,72 | -11,28 |



| IDENTIFICACIÓN DEL POZO (ID) | h (Obs.) msnm | h (Cal.) msnm | Residual msnm | IDENTIFICACIÓN DEL POZO (ID) | h (Obs.) msnm | h (Cal.) m | Residual m |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------------|------------------|---------------|---------------|
| 23 | 205,00 | 191,29 | -13,71 | 7456 | 214,00 | 206,17 | -7,83 |
| 25 | 173,00 | 169,82 | -3,18 | 7459 | 205,00 | 199,01 | -5,99 |
| 26 | 169,00 | 170,34 | 1,34 | 7468 | 196,00 | 181,78 | -14,22 |
| 27 | 173,00 | 174,18 | 1,18 | 7475 | 194,50 | 190,08 | -4,42 |
| 28 | 171,00 | 173,72 | 2,72 | 76 | 188,00 | 169,28 | -18,72 |
| 3 | 177,50 | 169,79 | -7,71 | 78 | 185,00 | 183,96 | -1,04 |
| 30 | 157,70 | 161,25 | 3,55 | 79 | 185,00 | 185,08 | 0,08 |
| 31 | 158,90 | 163,90 | 5,00 | 8 | 176,80 | 178,43 | 1,63 |
| 32 | 169,20 | 161,23 | -7,97 | 80 | 191,00 | 186,02 | -4,98 |
| 33 | 161,00 | 162,14 | 1,14 | 82 | 187,00 | 185,72 | -1,28 |
| 34 | 155,00 | 161,31 | 6,31 | 84 | 184,00 | 183,09 | -0,91 |
| 35 | 161,00 | 161,57 | 0,57 | 85 | 178,00 | 180,53 | 2,53 |
| 37 | 171,00 | 171,53 | 0,53 | 86 | 162,00 | 166,48 | 4,48 |
| 39 | 178,00 | 179,62 | 1,62 | 87 | 162,00 | 171,74 | 9,74 |
| 41 | 195,10 | 182,49 | -12,61 | 88 | 180,00 | 173,16 | -6,84 |
| 42 | 186,00 | 182,65 | -3,35 | 89 | 190,00 | 176,72 | -13,28 |
| 43 | 183,00 | 176,52 | -6,48 | 9 | 175,95 | 171,47 | -4,48 |
| 44 | 202,00 | 196,42 | -5,58 | 90 | 175,00 | 171,98 | -3,02 |
| 45 | 184,00 | 193,17 | 9,17 | 92 | 168,00 | 163,16 | -4,84 |
| 46 | 199,00 | 192,14 | -6,86 | 93 | 170,00 | 168,94 | -1,06 |
| 47 | 192,00 | 194,97 | 2,97 | 95 | 174,00 | 168,55 | -5,45 |
| 48 | 206,00 | 191,15 | -14,85 | 98 | 183,00 | 185,38 | 2,38 |
| 50 | 194,00 | 188,79 | -5,21 | AR5-PT | 163,44 | 160,87 | -2,57 |
| 51 | 175,00 | 187,99 | 12,99 | H9-PT | 157,14 | 167,56 | 10,42 |

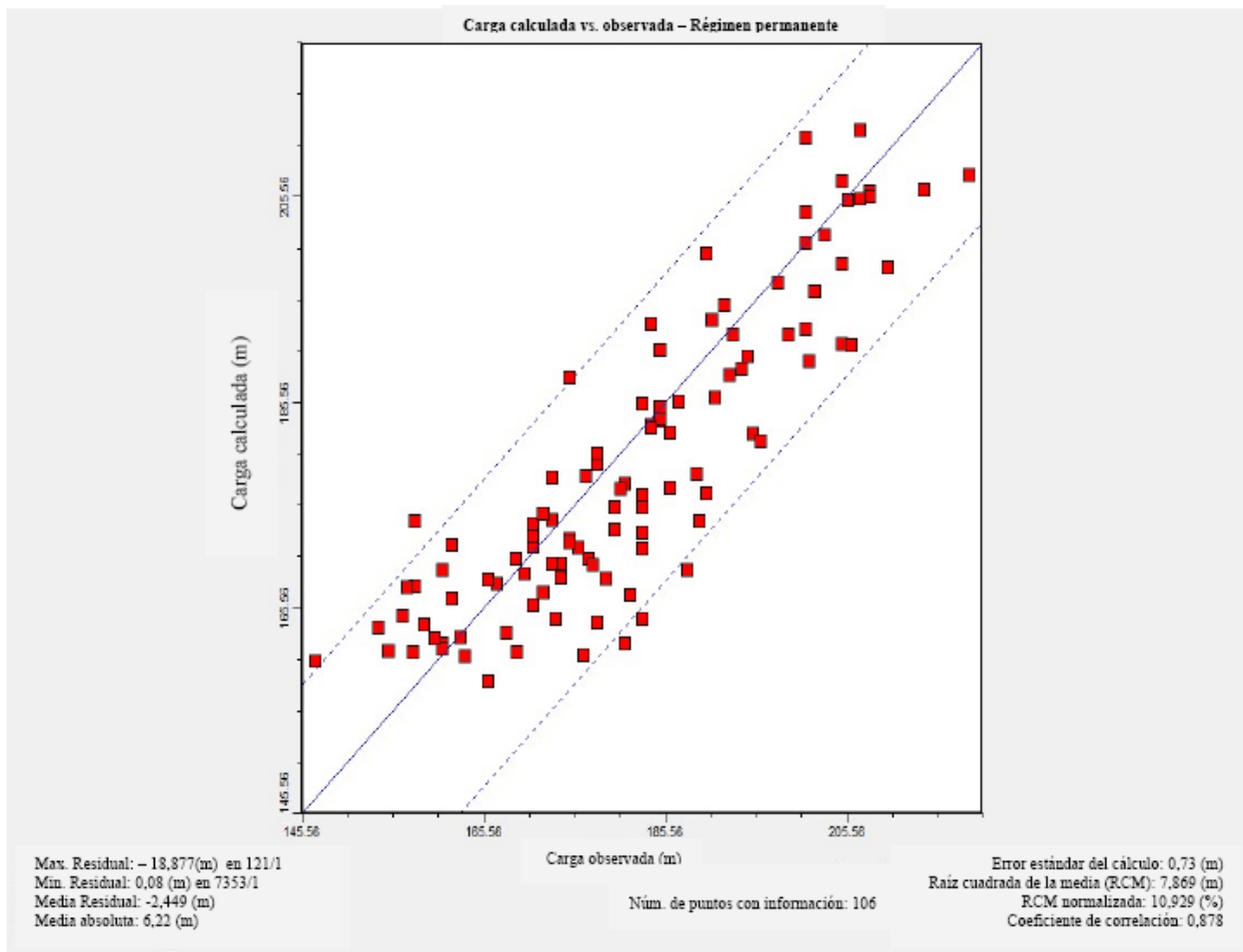


Figura 13 - Carga calculada vs. observada – Régimen permanente



**SNC-LAVALIN
International**





Al comparar el mapa de curvas piezométricas generado por el modelo, que se presenta en la Figura 14, con el mapa piezométrico del informe hidrogeológico que muestra la Figura 4, se puede ver que hay áreas donde hay una similitud general y hay otras áreas donde los mapas difieren. En el último caso, estas son principalmente las áreas donde no hay puntos con información de agua subterránea (es decir no hay pozos o perforaciones) y donde el modelo toma en cuenta los efectos del drenaje de agua superficial (es decir corrientes y ríos). Por ejemplo, en la parte sur del área de estudio las curvas piezométricas de la Figura 4 muestran el flujo de agua subterránea viajando desde el borde occidental del mapa en un sentido sureste y luego continuando al noreste hacia el borde este del mapa. Sin embargo el mapa piezométrico del modelo en régimen permanente muestra las direcciones de flujo de agua subterránea retrocediendo debido a los efectos del curso de agua superficial, es decir el flujo en el extremo sureste del área piloto tiene un sentido oeste.

Al no tener información real del nivel de agua subterránea en la parte sur del área de estudio, parece razonable asumir que el mapa generado por el modelo es una aproximación razonable de las condiciones reales, al menos dentro de la parte superior no confinada del acuífero libre.

Si la información histórica del nivel de agua durante series de tiempo de los diferentes pozos hubiera estado disponible entonces el modelo se hubiera calibrado con esa información. Sin embargo, ante la ausencia de tal información se decidió proceder con el modelo en régimen transitorio y validar el modelo con la información disponible de los ensayos hidráulicos. De ser necesaria, se llevaría a cabo otra calibración en ese momento.

En la Figura 15 se presentan los valores ajustados de la recarga en el modelo calibrado. La zona 1 corresponde al basalto, la zona 2 a la formación Rivera y la zona 3 al afloramiento, o sub-afloramiento, de la formación Tacuarembó.

4.2 Resultados de la calibración

Los resultados detallados que se obtuvieron con el modelo calibrado de flujo de agua subterránea se presentan en la Tabla 11. La tabla incluye el cálculo de la diferencia entre los niveles de agua calculados y observados. Estas diferencias, denominadas residuales, se calculan como:

$$R = h_{\text{obs}} - h_{\text{calc}}$$

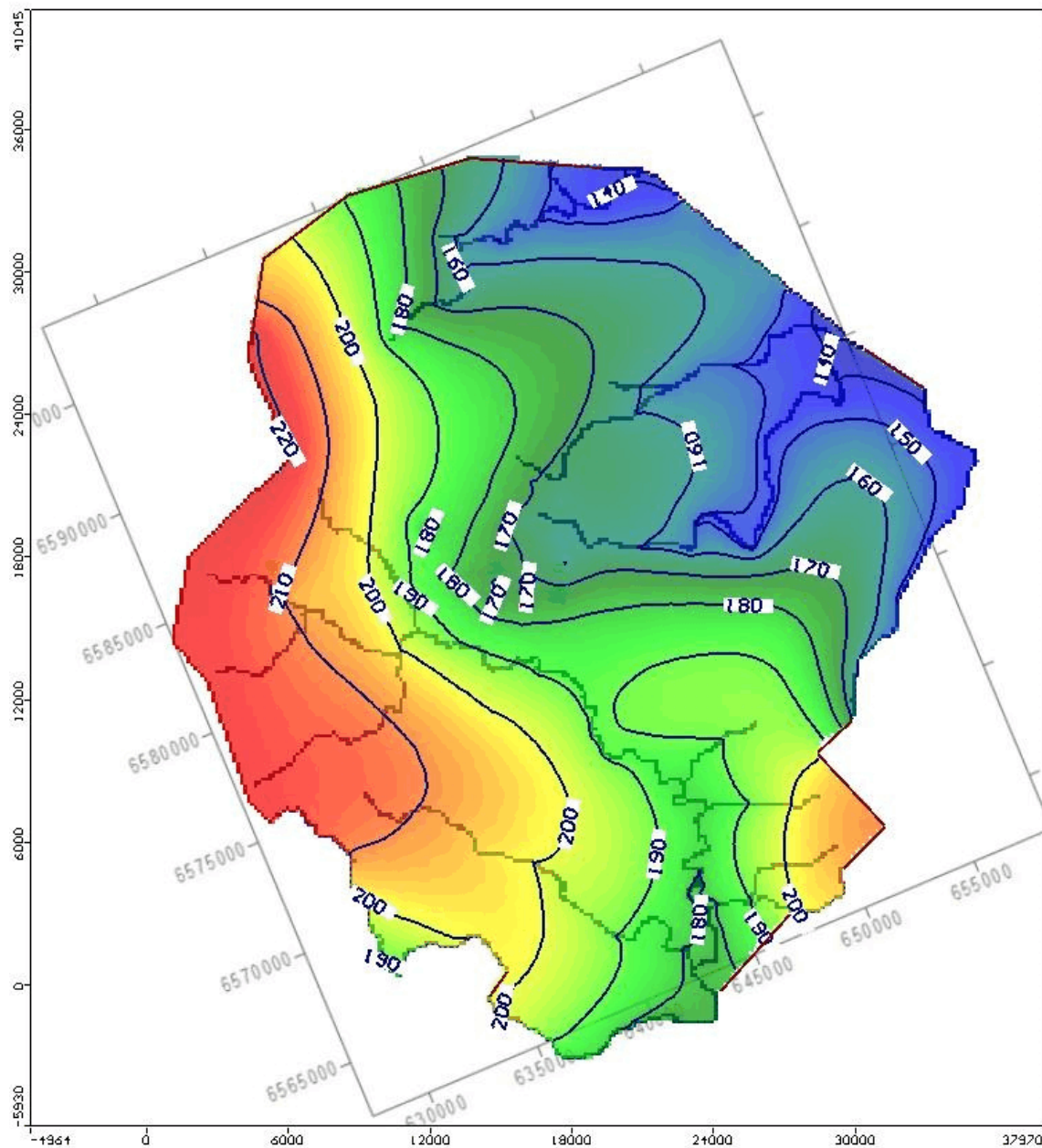


Figura 14 - Carga piezométrica calculada – Régimen permanente



**SNC-LAVALIN
International**



**Charlesworth
& Associates**
CONSULTING HYDROGEOLOGISTS



Donde, R es el residual, y h_{calc} y h_{obs} son los niveles de agua observados y calculados, respectivamente. Los residuales positivos indican los lugares donde los niveles de agua calculados son menores a los niveles observados. Los residuales negativos indican los lugares donde los niveles de agua calculados superan a los niveles de agua observados.

En la Figura 13 se ilustra la coincidencia entre los niveles de agua observados y calculados, junto con el resumen de las estadísticas de los residuales.

Una estadística clave para la aceptación del modelo es la desviación estándar normalizada de los residuales, definida como:

$$\text{NRMS (RCMN) (\%)} = \text{raíz media cuadrada residual} \times 100$$

Rango de observaciones

La raíz cuadrada media (RCM) residual es de 7,86 m. Los niveles de agua subterránea observados sobre la cuenca hidrográfica varían entre 147 msnm y 208 msnm. El rango en las observaciones es de 61 m. La RCM residual corresponde al 10,9% del rango de los niveles de agua observados. El estándar de la industria para una calibración aceptable sugiere que una RCM normal de 10 % del rango de observación es aceptable para un modelo de flujo de agua subterránea.

El coeficiente de correlación entre los niveles de agua observados y calculados es de 0,88. Spitz y Moreno (1996; 2003) sugieren que el coeficiente de correlación para un modelo de flujo calibrado adecuadamente debe estar entre 0,7 y 1,0.

Los residuales mínimos y máximos son de 0,88 m y -18,9 m, respectivamente, y la media absoluta es de 6,2 m.

La Tabla 12 presenta el balance hídrico para el modelo en régimen permanente y allí se puede ver que una cantidad significativa de la recarga posteriormente sale del acuífero como caudal base en las corrientes y ríos.



Tabla 12 – Balance Hidrológico en Estado Permanente – Rivera Santana

| Sistema Acuífero Guaraní | | | Ingreso Total (m ³ /d) | Salida Total (m ³ /d) |
|--------------------------------------|-----------------|--------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Ingreso (m³/d) | Carga constante | 46360 | 362047 | - |
| | Goteo de Río | 1787 | | |
| | Recarga | 313900 | | |
| Salida (m³/d) | Carga constante | 26122 | - | 362096 |
| | Goteo de Río | 261770 | | |
| | Recarga | 74204 | | |

4.3 Modelación en régimen transitorio

Una vez se calibró el modelo en régimen permanente, se utilizó luego una versión en régimen transitorio para duplicar los resultados de los ensayos hidráulicos en cada pozo para los cuales había información disponible. En esto consistió la parte de validación del proceso de modelación. Las cargas piezométricas derivadas del modelo en régimen permanente se utilizaron como información de ingreso para el modelo en régimen transitorio.

Los ensayos hidráulicos se habían desarrollado en varios pozos y por lo tanto estaban disponibles los resultados de tasas de extracción y los abatimientos relacionados. Además, en el caso de algunos pozos, la transmisividad se había determinado a partir de los ensayos hidráulicos, haciendo posible calcular de la conductividad hidráulica del acuífero en las inmediaciones de aquellos pozos. Había información disponible de ensayos hidráulicos para los pozos en Parque Hidráulico, Armour y Central Eléctrica.

Cuando se introdujeron al modelo los detalles de los ensayos hidráulicos de los pozos, el espaciamiento de la cuadrícula dentro de los alrededores de los pozos de extracción se redujo desde los 150 m con el fin de tener un mejor control al calibrar usando los resultados de los ensayos hidráulicos. Esto elevó el número total de celdas activas a 48.232 por capa.

Luego se ejecutó el modelo en condiciones de régimen transitorio, inicialmente prendiendo los pozos de manera separada y ejecutando el modelo durante el tiempo que duró cada ensayo



hidráulico. Esto se repitió para cada pozo y, en cada caso, se necesitaron diferentes ejecuciones del modelo, con cambios en los campos de conductividad hidráulica local con el fin de obtener una coincidencia aceptable. Esta calibración adicional del modelo es una parte inevitable del proceso de validación. En general, los valores de conductividad hidráulica obtenidos durante la validación del modelo cerca de los pozos de bombeo son inferiores que en los pozos de observación. Esto puede deberse a que hay pérdidas que ocurren en los pozos de bombeo durante el ensayo. Por lo tanto se necesita usar valores más bajos de conductividad hidráulica cerca de los pozos de bombeo para poder duplicar los datos observados. Los valores de conductividad hidráulica de los pozos de observación en general son mas representativos de los parámetros regionales del acuífero.

Se evaluó el éxito del proceso de calibración al comparar los abatimientos observados y calculados para los ensayos hidráulicos. En las Tablas 13 a 15 se muestran las comparaciones de los resultados simulados contra los observados para los ensayos hidráulicos en los pozos.

Tabla 13 - Resultados simulados vs. observados para el ensayo hidráulico en el Parque Hidráulico/H11

| Pozo | Abatimiento observado (m) | Abatimiento simulado (m) | Conductividad hidráulica utilizada en el modelo (m/día) |
|------|---------------------------|--------------------------|---|
| H-11 | 53 | 53,4 | 0,048 |
| H-9 | 0,34 | 0,68 | 1,2 |

Tabla 14 - Resultados simulados vs. observados para el ensayo hidráulico en Armour/AR-4

| Pozo | Abatimiento observado (m) | Abatimiento simulado (m) | Conductividad hidráulica utilizada en el modelo (m/día) |
|------|---------------------------|--------------------------|---|
| AR-4 | 36,4 | 36,16 | 0,75 |
| AR-5 | 4,1 | 3,21 | 0,75 |

Tabla 15 - Resultados Simulados vs. observados para el Ensayo Hidráulico en la Central Eléctrica/ Pozo 10-4-037

| Pozo | Abatimiento observado (m) | Abatimiento simulado (m) | Conductividad hidráulica utilizada en el modelo (m/día) |
|----------|---------------------------|--------------------------|---|
| 10-4-037 | 29,22 | 36,28 | 0,45 |
| 10-4-038 | 10,37 | 6,42 | 0,09 |



5.0 MODELACIÓN PREDICTIVA

5.1 Objetivos

El objetivo principal del modelo informático del área piloto Rivera-Santana do Livramento es el de asistir en el planeamiento de la explotación futura de los recursos de agua subterránea en el área y del suministro de agua a las dos ciudades.

Para este fin se simularon tres escenarios de explotación, todos los cuales involucraban la reubicación de pozos existentes, uno en cada uno de las dos ciudades, alejándolos de las áreas que a lo largo de los años han presentado disminuciones significativas en los niveles de agua subterránea.

5.2 Escenario 1

Para el primer escenario se asumió que se perforarían cinco pozos nuevos, cada uno con una capacidad de 50 m³/h, en el Parque Gran Bretaña y se cerrarían varios pozos existentes en el área sobre explotada de Rivera con el fin de reducir el bombeo en esa área en una cantidad equivalente a la capacidad de los pozos. Para alcanzar esto se requeriría cerrar ocho pozos en Rivera.

5.3 Escenario 2

Para el segundo escenario se asumió que se perforarían ocho pozos nuevos, cada uno con una capacidad de 50 m³/h, en el Barrio Registro y se cerrarían varios pozos existentes en el área sobre explotada de Santana do Livramento con el fin de reducir el bombeo en esa área en una cantidad equivalente a la capacidad de los pozos nuevos. Para alcanzar esto se necesitaría cerrar siete pozos en Santana do Livramento.



5.4 Escenario 3

El tercer escenario es una combinación de los dos primeros, es decir se asumió que se perforarían ocho pozos nuevos, cada uno con una capacidad de 50 m³/h, en el Barrio Registro, y se perforarían otros cinco pozos nuevos, cada uno con una capacidad de 50 m³/h, en el Parque Gran Bretaña. Al mismo tiempo, se cerrarían siete pozos en Santana do Livramento y ocho en Rivera con el fin de reducir el bombeo en aquellas áreas en una cantidad igual a la capacidad de los pozos nuevos.

5.5 Impactos de los escenarios de explotación

Se restringieron los efectos de la reubicación simulada de los pozos de bombeo a las cercanías de los terrenos donde se encuentran los pozos y tenían poco o ningún impacto sobre las cargas piezométricas calculadas en la mayoría del área piloto. Por lo tanto, las figuras que muestran las cargas piezométricas calculadas para los tres escenarios se han ampliado, con fines ilustrativos, para incluir solamente las principales áreas urbanas de las dos ciudades, y se muestran en las Figuras 16, 17 y 18. Al comparar estos mapas con el mapa piezométrico para el modelo en régimen permanente se puede ver que, como se esperaba, hay algunos cambios en los niveles de agua subterránea en las áreas donde se cerraron los pozos, y en las áreas donde se agregaron pozos nuevos

A fin de poder apreciar de cómo variarían las cargas piezométricas dentro de los campos de pozos (existentes y propuestos) con el transcurso del tiempo, se graficaron los datos de cuatro de los pozos de observación del modelo y el tiempo de cuarenta años para la simulación del escenario 3 con modelo en régimen transitorio. Se seleccionó un pozo dentro del área de bombeo incrementado en el Parque Gran Bretaña (Pozo A) y otro pozo dentro del área de bombeo incrementado en el Barrio Registro (Pozo B). El Pozo C se seleccionó porque su ubicación dentro del área propuesta para bombeo reducido dentro del sector urbano de Rivera y el Pozo D está ubicado en el área propuesta para bombeo reducido en el sector urbano de Santana do Livramento. Las cargas piezométricas en los pozos A y B se muestran en la Figura 19 y las cargas calculadas para los pozos C y D se muestran en la Figura 20.

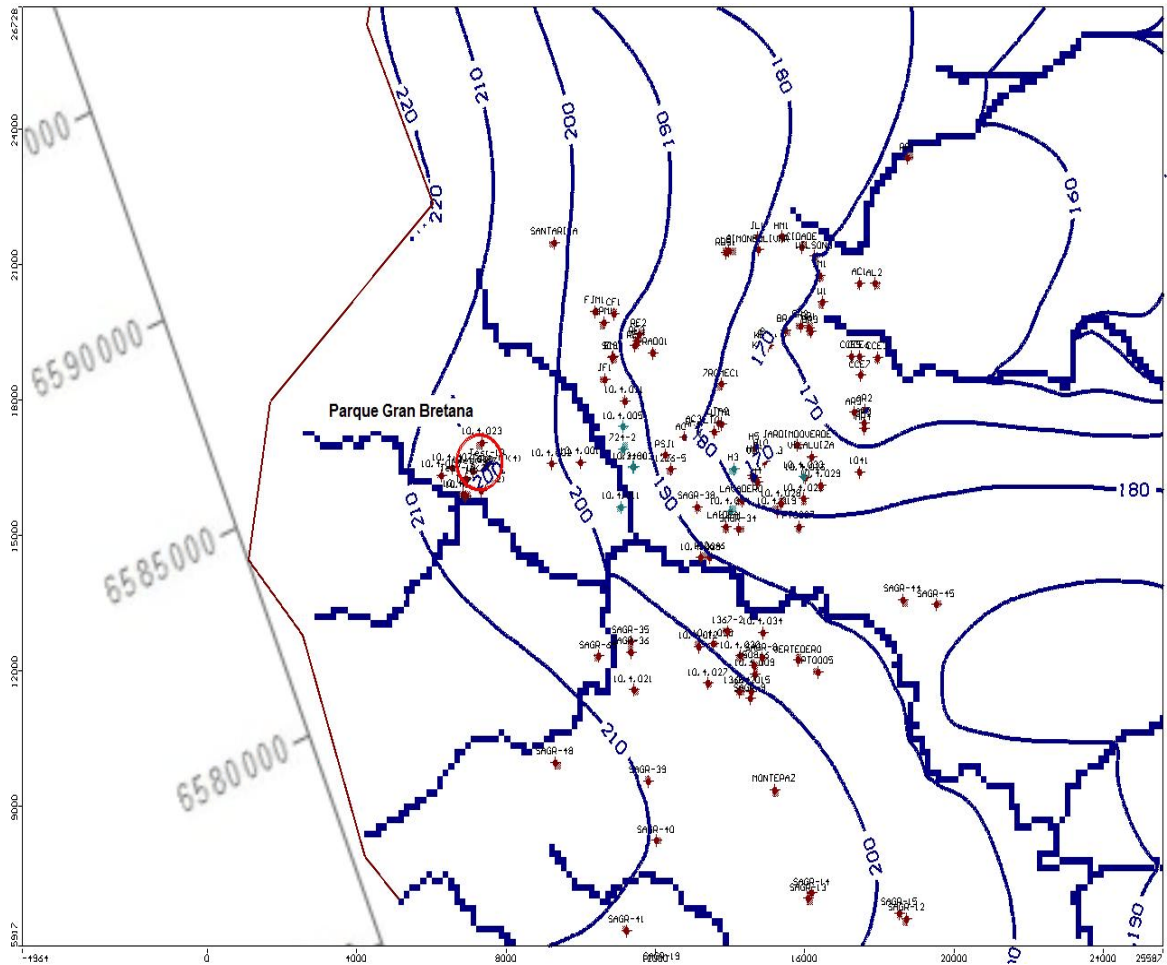


Figura 16 - Carga piezométrica – Escenario 1

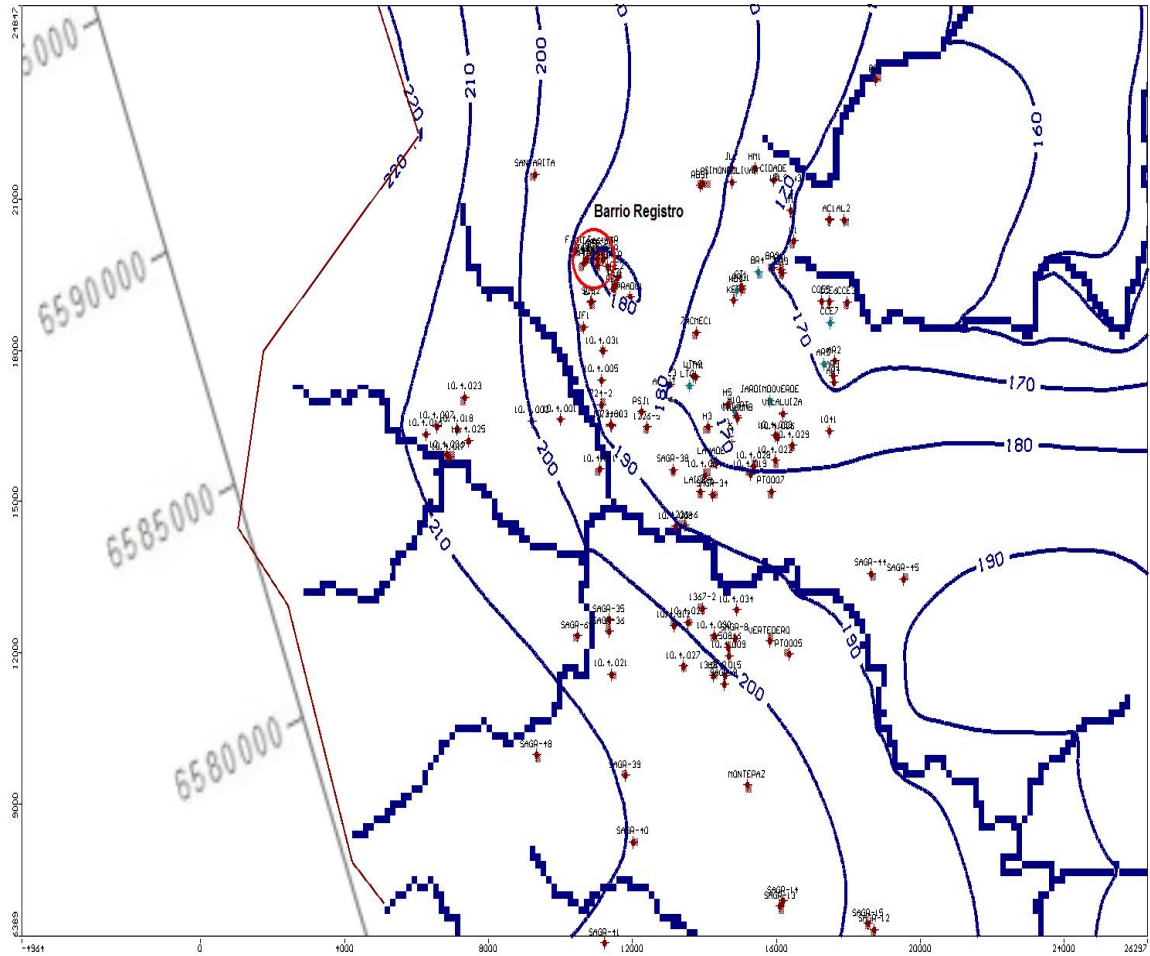


Figura 17 - Carga piezométrica – Escenario 2



SNC-LAVALIN
International



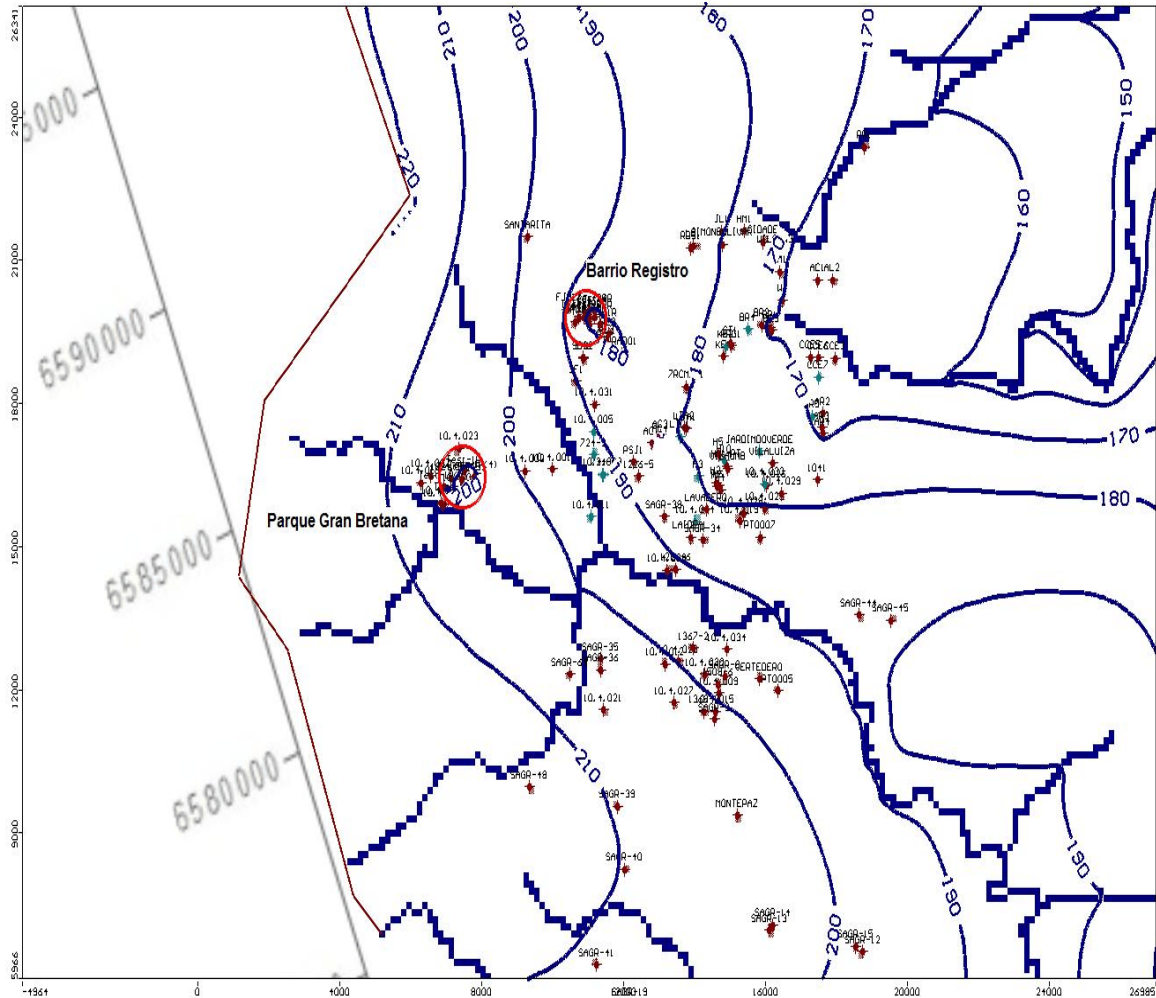


Figura 18 - Carga piezométrica – Escenario 3



En la Figura 19 se observa que hay un descenso significativo de las cargas piezométricas en las vecindades inmediatas de los nuevos pozos simulados dentro de los primeros años pero luego de 20 años la situación se acerca a un estado constante. Por el contrario, en las inmediaciones de los pozos que se cerraron en el escenario desarrollado, los niveles del agua muestran una recuperación durante los primeros 20 años y luego se aproximan a un estado constante. Sin embargo, cabe señalar, que estos pozos de observación se encuentran ya sea muy próximos a los nuevos pozos virtuales (ej. el caso de pozos A y B) o muy próximos a los pozos que fueron cerrados en la simulación (ej. el caso de los pozos C y D).

Si se observa desde una escala más regional (Figuras 16, 17 y 18), luego de 40 años de bombeo simulado se puede decir que no ha habido una mejora significativa en el abatimiento general dentro de las áreas urbanas principales. Asimismo, tampoco se produjo un descenso importante de los niveles de agua alrededor de los nuevos campos de pozos.

La falta de cambios significativos, tanto negativos como positivos, probablemente no sea sorprendente ya que los pozos reubicados siguen obteniendo agua del mismo sector del acuífero. Por ejemplo, los pozos en Rivera, que se reubicaron en el Parque Gran Bretaña en los escenarios 1 y 3, se hallan aguas arriba del área urbana altamente desarrollada y por lo tanto, cuando operan en el modelo, interceptarán agua que previamente hubiera fluido hacia el área dónde se encontraban ubicados inicialmente los pozos.

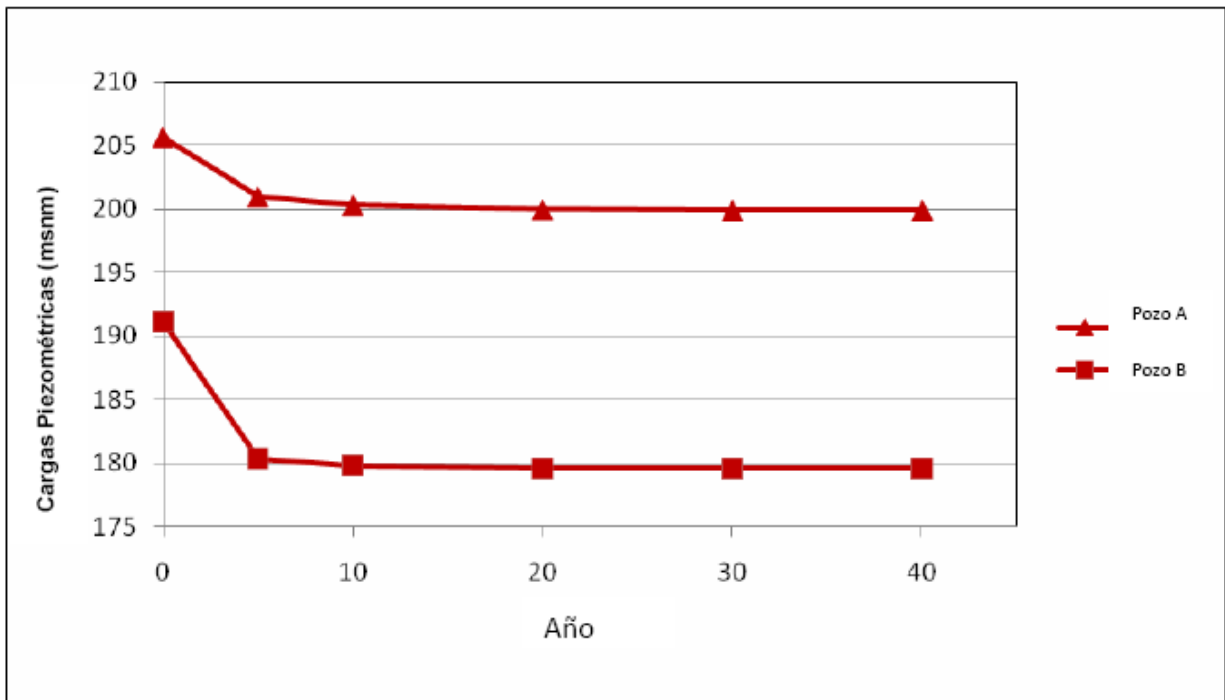


Figura 19. Cargas piezométricas calculadas – Nuevos campos de pozos

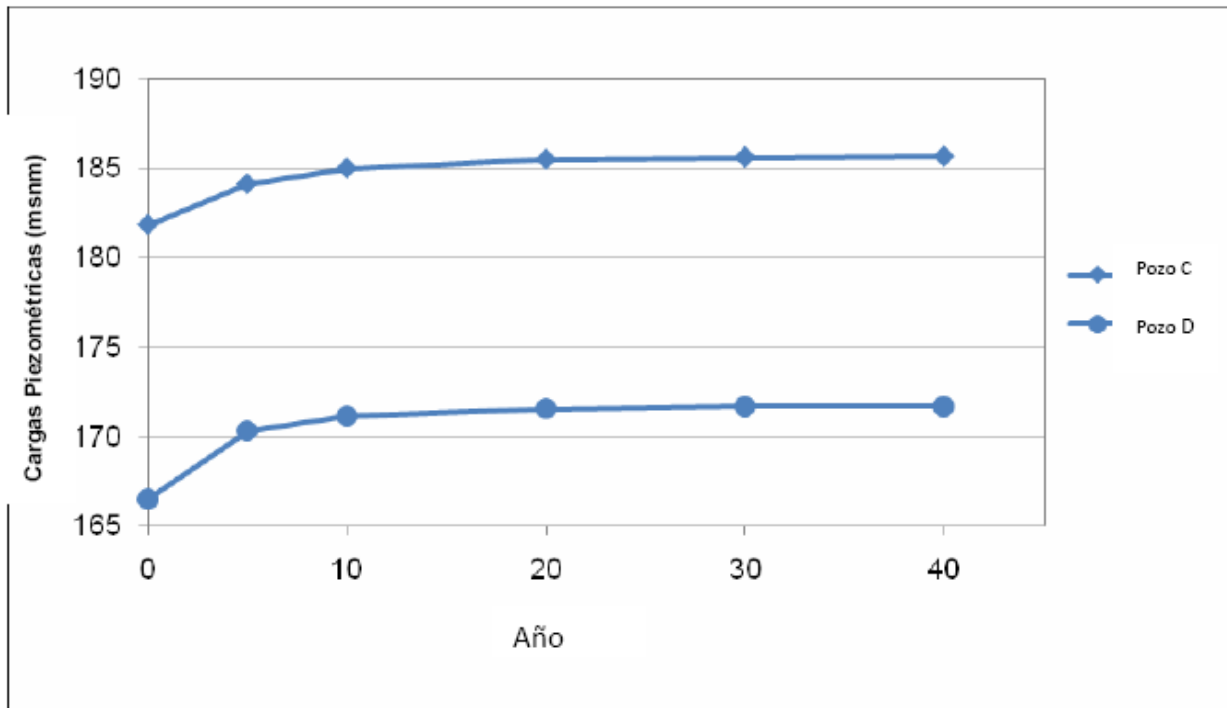


Figura 20: Cargas piezométricas calculadas – Áreas de bombeo reducido



6.0 CONCLUSIONES

6.1 Limitaciones del Modelo numérico

Domenico (1972) observó que un modelo es una representación de la realidad que trata de explicar el comportamiento de algunos aspectos de esa realidad, y señaló que éste siempre es menos complejo que el sistema que representa. Así mismo, Wang & Anderson (1982) señalaron que un modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad. Un modelo, no importa cuán sofisticado sea, nunca describirá el sistema de agua subterránea bajo estudio sin que la simulación del modelo se desvíe del proceso físico real. (Spitz y Moreno, 1996).

Aún más importante, los mismos autores señalaron que los modelos numéricos no dan respuestas exactas a los problemas que no están lo suficientemente definidos.

En el caso del área piloto de Rivera-Santana do Livramento hay bastante información sobre los pozos relacionada con las principales áreas urbanas de las dos ciudades y sus inmediaciones, aunque en el resto del área piloto la información sobre el agua subterránea es escasa. Sin embargo, a pesar haber información disponible sobre más de 130 pozos, aún existen preguntas relacionadas con la naturaleza del Acuífero Guaraní en esta área. Por ejemplo la postura que prevalece era que la formación Rivera, que es la unidad superior del Guaraní, es más permeable que la formación Tacuarembó subyacente. Sin embargo, el estudio previo de modelación (Rodríguez et al, 2006) desarrolló una evaluación exhaustiva de la información y concluyó que el sistema tenía una unidad del acuífero somera y menos permeable, y una unidad profunda más permeable, y que las dos estaban separadas por un acuitardo en, al menos, una parte del área de estudio. Esta puede ser una interpretación válida de la hidrogeología local; sin embargo, en este estudio no fue posible confirmar esto con la información que estaba disponible.

Debido a esta falta de información confiable, y las interpretaciones contradictorias, se tomó la decisión de modelar el área basándose en la opinión popular de que las areniscas de la formación Rivera son más permeables que las de la formación Tacuarembó. Además, con base en el mapa geológico (Bossi, 1998), se asumió que la formación Rivera está presente en



superficie o debajo del basalto en la parte norte del área de estudio, es decir, en la mayor parte de las áreas principales donde se extrae el agua subterránea.

6.2 Resultados del Modelo numérico

Los resultados de la modelación sugieren que una parte considerable de la recarga del acuífero dentro del área de estudio se descarga posteriormente como caudal base en las corrientes y ríos. De hecho, el balance hídrico en el modelo indica que el agua que se descarga a la superficie es más de 3,5 veces el agua que se extrae de los pozos. Según la experiencia esto parece demasiado elevado, pero aunque los números reales pueden no ser exactos, parece razonable asumir que el concepto tiene sentido.

Los resultados de la modelación predictiva sugieren que, para rectificar las situación de sobreexplotación dentro de las áreas urbanas más importantes, será necesario reducir la extracción actual en más de la cantidad simulada para los escenarios de explotación- 250m³/h (6000 m³/d) en Rivera y 400 m³/h (9600 m³/h) en Santana do Livramento. Esta cantidad, que da un total de 650 m³/d o 15.600 m³/d representa el 21 % de la extracción total de 74.200 m³/d para las dos ciudades.

En términos de reubicación de pozos, el resultado de la modelación sugiere que las áreas propuestas para la reubicación de los pozos, como se simuló en el modelo, están probablemente muy cerca a las áreas actuales de alta extracción y que por lo tanto las explotaciones futuras de áreas de pozos deberían ubicarse en lugares más alejados de la principal área urbana. Aunque esto obviamente involucraría mayores costos de distribución del agua, tendría la ventaja de reducir la sobreexplotación en el área urbana y también reduciría la dependencia en los pozos que tienen riesgo de ser afectados por la contaminación en la superficie.



7.0 RECOMENDACIONES

Se han realizado dos ejercicios recientes de modelación para el área piloto Rivera- Santana do Livramento y, a pesar de haber adoptado diferentes modelos conceptuales, han llegado a las mismas conclusiones. Por lo tanto, se recomienda que no se hagan mas modelaciones del área piloto mientras no se recopile información nueva.

Las deficiencias en la información encontradas en el presente estudio de modelación incluyen:

- Falta de información detallada confiable sobre las características del acuífero dentro del área principal de explotación.
- Falta general de información hidrogeológica sustancial en la mayor parte del área de estudio, es decir, más allá del grupo actual de pozos dentro y alrededor de las dos ciudades.
- Aparente falta de información hidrológica sobre el drenaje superficial dentro del área.
- Falta de información confiable relacionada con un número de pozos privados y pozos en las dos ciudades, especialmente en relación a las tasas reales de extracción anual.
- Falta de información, histórica y estacional, sobre el nivel de agua durante series de tiempos.

En vista de las deficiencias aparentes en la información antes mencionada, se recomienda que se implemente un programa de adquisición de información por toda el área piloto. Esta debería incluir:

- La perforación de una serie de pozos de diámetro pequeño con el fin de recolectar información geológica e hidrogeológica tanto dentro de los campos existentes de pozos como en otros lugares dentro del área piloto. Se deben recolectar y registrar geológicamente las muestras testigos con el fin de determinar mas exactamente los contactos subsuperficiales entre las diferentes unidades del Acuífero Guaraní e, idealmente, se llevaría a cabo ensayos con obturadores (packer testing) en cada pozo



para determinar los perfiles de permeabilidad a través del acuífero. En cada uno de esos sitios, una vez se complete el pozo principal, y se lleve a cabo los ensayos con obturadores (packer testing), se debería perforar un pozo intermedio y somero a lo largo del primer pozo para crear nichos piezométricos con fines de monitoreo. No sería necesario tomar una muestra y realizar un ensayo con obturadores (packer testing) de los pozos intermedios y someros, ya que la información se recolectaría del pozo primario. Los tres pozos en cada lugar se deberían completar con una tubería de revestimiento y filtros de PVC de 50 mm de diámetro.

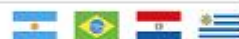
- La identificación de los pozos y perforaciones abandonadas existentes que se podrían incorporar en una red de monitoreo piezométrico junto con los nuevos pozos descritos anteriormente. Los niveles estáticos de agua deberían medirse, al menos, mensualmente y, si es posible se deberían instalar transductores en algunos pozos.
- Se debería exigir a todos los dueños de los pozos que usen medidores para registrar mensualmente el uso del agua.
- Se debería llevar a cabo un estudio hidrológico para tener una mejor comprensión del flujo de agua superficial en toda el área de estudio. Si en la actualidad no existen estaciones de aforo, éstas se deberían instalar en las principales corrientes y ríos y se deberían hacer mediciones de caudales bajos en la mayor cantidad de corrientes posibles con el fin de calcular los aportes a los caudales de base.
- Se debería alentar a las agencias públicas que suministran agua para que realicen perforaciones y ensayos exploratorios en nuevas áreas, lejos de las áreas actualmente sobreexplotadas. Deberían llevarse a cabo ensayos hidráulicos exhaustivos en todos los pozos nuevos.

Solo cuando se hayan implementado los programas antes mencionados, y se haya recopilado una cantidad razonable de información nueva, se debería actualizar el modelo numérico del área.



REFERENCIAS

- Bossi J., L. Ferrando, J. Montaña, N. Campal, H. Morales, F. Gancio, A. Schipilov, D. Piñeyro, P. Sprechman, 1998. Carta Geologica del Uruguay Versión 1.0. Facultad de Agronomía, Cátedra de Geología, Uruguay.
- Collazo P., M. Auge, J. Montaña, 2005. Vulnerabilidad y Riesgo Hidrogeológico del SAG en el Área Aflorante de Rivera, Uruguay. Fondo de Universidades, Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.
- De Santa Ana, H.; Fernández Garrasino, C.; Fulfaro, F., 2006. Proyecto para la protección Ambiental y Desarrollo sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay). Primer Informe Geológico. Consorcio Guaraní. Montevideo, Uruguay.
- Domenico, P. A., 1972. Concepts and Models in Groundwater Hydrology. McGraw-Hill, New York, USA.
- Gilboa Y, F. Mero, B. Mariano, 1976. The Botucatú aquifer of South America, model of an untapped continental aquifer. Journal of Hydrology, 29, pp 165-179.
- Gilboa, Y., 1977. The groundwater resources of Uruguay. Hydrological Sciences, XXII, 1.
- Gómez A.A., L. B. Rodríguez and L.S. Vives, 2006. Finite Difference Model for Evaluating the Recharge of the Guaraní Aquifer System on the Uruguayan Brazilian Border. Mecánica Computacional Vol XXV, pp. 1479-1496.
- Gómez A.A., 2007. Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las Formaciones Tacuarembó - Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay. Tesis remitida para Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Del Litoral.
- Harbaugh, A.W., 1990. A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-392, 46 p
- Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill, and M.G. McDonald, 2000. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: United States Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.
- Montaña J. y R. Carrión, 1990. Optimización de la explotación del sistema acuífero Jurásico Triásico Tacuarembó-Buena Vista. Anais 6º Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas. Trabajo Nº 44, pp. 181-189.
- Oleaga A., 2002. Contribución a la Hidrogeología del Acuífero Guaraní en el Sector Uruguay. Un enfoque Integral. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra (Aguas Subterráneas). Instituto de Geología. UNAM. México D.F., México.



- Oleaga A, & J. De los Santos, 2003. Nuevo análisis para la determinación de parámetros hidráulicos en pozos del acuífero Guaraní (Uruguay). Discusión comparativa. III Congreso Argentino de Hidrogeología. Rosario, Argentina. Septiembre 2003.
- Piñeiro, G., C. Marsicano, & N. Lorenzo, 2007. A new temnospondyl from the Permo-Triassic Buena Vista Formation of Uruguay. *Palaeontology*, 50:627-640.
- Rodríguez L, A. Gómez, A. Oleaga, F. Pacheco, G. Roullier, N. Seoane, A. Silva Busso & L. Vives, 2006. Informe Final del proyecto "Desarrollo Metodológico para la Evaluación de la Recarga y la Vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní en Argentina y Uruguay", Fondo de Universidades, Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.
- Silva Busso A., 1999. Contribución al Conocimiento Geológico e Hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanaense Oriental Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Cs. Exactas y Naturales, UBA.
- Spitz K. & J. Moreno, 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Sracek O and R. Hirata, 2002. Geochemical and Stable Isotopic Evolution of the Guaraní Aquifer System in the State of Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal* Vol 10, pp 643-655.
- SNC-Lavalin, 2008. Hidrogeología Local del Área piloto Rivera-Santana do Livramento
- Wang H.F., and M.P. Anderson, 1982. Introduction to Groundwater Modeling. W.H. Freeman and Co.,
- Waterloo Hydrogeologic Inc., 2005. Visual Modflow User`s Manual, version 4.1.0, Waterloo, Canada.