



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE NICARAGUA  
UNAN-Managua**

**CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN EN RECURSOS  
ACUÁTICOS DE NICARAGUA (CIRA/UNAN)**



**MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA**



**CRITERIOS HIDROGEOLOGICOS PARA LA FORMULACION DEL  
PLAN DE GESTION EN EL ACUIFERO DEL VALLE DE SEBACO**

Por

Ing. Yelba Flores Meza

Tesis presentada a la Dirección de Postgrado de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, como requisito parcial para el obtener el grado de Master en Ciencias

Managua, mayo de 2004

**CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN EN RECURSOS  
ACUÁTICOS DE NICARAGUA  
(CIRA/UNAN)**

**MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA**

**CRITERIOS HIDROGEOLOGICOS PARA LA  
FORMULACION DEL PLAN DE GESTION EN EL  
ACUIFERO DEL VALLE DE SEBACO**

Autora: Ing. Yelba Flores Meza

Director de Tesis: Msc. Enoc Castillo Hernández

Asesor: MSc. Salvador Montenegro Guillén

Asesora: MSc Marissa Espinoza

Tesis presentada a la Dirección de Postgrado de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, como requisito parcial para el obtener el grado de Master en Ciencias

Managua, mayo de 2004

## **DEDICATORIA**

A mi hijo Carlos, por soportar el abandono a que fue sometido, para la culminación de mis estudios y la realización del presente trabajo.

A mi madre Carmen, por ser tan especial y apoyarme en todas mis decisiones.

A mis hermanas, Claudia, Flor, Marisol, por estar conmigo en todos los momentos.

A mis sobrinas Rubenia, Tania, Yelba y Elizabeth, que como nueva generación, son una inspiración para la búsqueda de la solución de los problemas ambientales. A mi padre Ignacio, mis hermanos Antonio, José Ignacio, Kenneth, quienes también estuvieron a mi lado apoyándome.

A la dulce memoria de mi hermano Carlos, quien sería muy feliz de ver mi superación profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

A don Luis Palacios Ruiz, don Salvador Montenegro Guillén, Katherinne Vammen, por la confianza depositada en mi, al permitirme realizar los estudios de Maestría en Ciencias del Agua, así como su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios y el trabajo de tesis.

A David Bethune, quien a través del Proyecto Red Centroamericana de Recursos Hídricos, auspiciado por la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional, estableció el Programa de Maestría en Nicaragua que está formando profesionales de alta calidad.

A Thelma Salvatierra y Esnela Fierro, por su incondicional apoyo, durante el tiempo de estudio.

A Ramón Dávila, por ser un gran compañero y estar siempre dispuesto a disipar mis dudas acerca de los SIG.

A mi tutor Enoc Castillo por su excelente guía en todos los aspectos de este trabajo.

A Heyddy Calderón, por sus oportunas aclaraciones acerca del modelo matemático.

A Elizabeth Peña y Valeria Delgado, por apoyarme y darme ánimos a lo largo de y todos mis amigos.

A todo el personal de la Dirección de Recursos Hídricos y Meteorología del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, por facilitarme la información que sirvió de base para la realización del presente estudio.

## CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>ii</b>
CONTENIDO.....	iii
APENDICE.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE GRAFICOS.....	ix
RESUMEN.....	xiv
<b>I. INTRODUCCION</b> .....	<b><u>i1</u></b>
I.1 Antecedentes .....	3
I.2 Definición del Problema y Justificación del Estudio.....	4
I.3 Objetivos del Proyecto .....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
<b>II. MARCO TEORICO</b> .....	<b>7</b>
II.1 Ubicación del Área de Estudio .....	7
II.2 Geomorfología.....	8
II.3 Climatología .....	9
II.4 Geología.....	10
2.4.1 Geología Histórica y Estructural .....	10
II.5 Suelo .....	13
2.5.1 Clasificación taxonómica .....	13
2.5.2 Uso Potencial del Suelo.....	14
2.5.3 Uso Actual del Suelo.....	14
II.6 Aguas Superficiales.....	17
II.7 Hidrogeología.....	17
2.7.1 Medio Hidrogeológico .....	17
2.7.2 Piezometría.....	18
2.7.3 Propiedades Hidráulicas .....	19
2.7.4 Hidrogeoquímica.....	21

2.7.5 Condiciones de Recarga.....	22
2.7.6 Condiciones de Descarga.....	23
III. DISEÑO METODOLÓGICO.....	24
IV. RESULTADOS Y DISCUSION .....	29
IV.1 Condiciones ambientales de la Cuenca de Captación Superficial y el Acuífero del Valle de Sébaco .....	29
IV.2 Caracterización del Acuífero .....	30
4.2.1 Extensión y Geometría del Acuífero .....	30
4.2.2 Unidades Hidroestratigráficas.....	31
4.2.3 Determinación de las Unidades Hidroestratigráficas .....	42
4.2.4 Basamento del Acuífero.....	43
4.2.5 Superficie Piezométrica .....	45
IV.3 Estimación de la Recarga Natural.....	49
4.3.1 Cálculo de la Recarga por el Balance Hídrico de Suelos. Lirios – Losilla	51
4.3.2 Por el Contenido de Tritio ( <sup>3</sup> H) Termonuclear. Plata, A.1998 .....	52
4.3.3 Por la Fórmula Analítica Schosinsky - Losilla .....	53
4.3.4 Infiltración a través del cauce de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa..	55
IV.4 Relación Agua Superficial – Agua Subterránea .....	57
IV.5 Estimación de la Recarga de Retorno por Riego .....	58
4.5.1 Condiciones Actuales de Explotación.....	58
4.5.2 Producción Actual y Proyectada del Campo de Pozos Para abastecimiento de Agua Potable a la Ciudad de Matagalpa.....	59
IV.7 Descarga del Acuífero.....	60
V. MODELO NUMERICO .....	62
V.1 Diseño del Modelo .....	62
5.1.1 Dominio del Modelo .....	62
5.1.2 Capas del Modelo .....	64
5.1.3 Condiciones de Frontera.....	65
5.1.4 Zonas de Recarga .....	68
5.1.5 Conductividad Hidráulica .....	69
V.2 Calibración del Modelo.....	70
5.2.1 Régimen en Estado Estacionario.....	70
5.2.2 Estrategia de Calibración del Modelo .....	71
a) Condiciones de Frontera.....	73
b) Recarga .....	75
c) Conductividad Hidráulica.....	77
5.2.3 Resultados de la Calibración .....	79
V.3 Verificación del Modelo.....	80
5.3.1 Recarga de Retorno por Riego .....	81
5.3.2 Niveles Piezométricos.....	82

5.3.3 Balance Hídrico .....	83
V.5 Superficie Piezométrica .....	86
V.6 Análisis de Sensibilidad del Modelo .....	88
5.6.1 Recarga .....	88
5.6.2 Conductividad Hidráulica .....	88
V.7 Simulación del Efecto Provocado por el Campo de Pozos de Chagüitillo ....	89
VI. HIDRODINAMICA DEL ACUIFERO .....	93
VII. DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO .....	97
VIII. LIMITACIONES DEL MODELO .....	99
IX. CONSECUENCIAS DE LA EXPLOTACION DEL ACUIFERO .....	101
X. PERFIL DEL PLAN DE GESTION DEL ACUIFERO DEL SEBACO .....	103
X.1 Introducción .....	103
X.2 Objetivos .....	104
X.3 Diversidad Socioeconómica del Valle .....	104
X.4 Lineamientos del Plan Hídrico del Valle.....	107
X.5 Generación de Proyectos en el Ambito de Sostenibilidad Hídrica del Valle	107
X.6 Involucramiento Institucional de la Gestión del Recurso Hídrico .....	110
X.7 Proyecciones de la Gestión del Plan a Corto, Mediano y Largo Plazo .....	111
X.8 Perspectivas de Desarrollo Integral del Recurso y Soluciones.....	111
X.9 Manejo Integral y Aplicación de Políticas del Recurso Hídrico .....	112
XI. CONCLUSIONES.....	113
XII. RECOMENDACIONES.....	116
XIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	117

## APENDICE A

Tabla No.A.1.Pozos con registros litológicos utilizados en la caracterización del acuífero.....	120
Tabla No.A.2. Pozos de Observación año 2002.....	121
Tabla No. A.3. Balance Hídrico de Suelos-Textura Franco Arenoso.....	123
Tabla No.A.4. Balance Hídrico de Suelos-Textura Arenoso.....	124
Tabla No.A.5. Balance Hídrico de Suelos –Textura Franco Arenoso.....	125
Tabla No.A.6. Balance Hídrico de Suelos- Textura Arcilloso.....	126
Tabla No.A.7. Balance Hídrico de Suelos – Fórmula Schosinsky-Losilla.....	127
Tabla No.A.8. Pozos de Explotación y Caudal de Extracción.....	128

## APENDICE B 131

Figura B.1. Perfil Hidrogeológico Transversal (Chagüitillo).....	132
Figura B.2. Perfil Hidrogeológico Transversal (Sébaco-San Isidro).....	133
Figura B.3. Perfil Hidrogeológico Transversal (Centro del Valle).....	134
Figura B.4. Perfil Hidrogeológico Transversal (Sur del Valle).....	135
Figura B.5. Perfil Hidrogeológico Longitudinal 1L.....	136
Figura B.6. Perfil Hidrogeológico Longitudinal 2L.....	137
Figura B.7. Pozos de Observación 1980-1990.....	138
Figura B.8. Pozos de Observación 2002.....	139

## LISTA DE TABLAS

Tabla No.II.1.Promedios mensuales de precipitación luvial en el Valle de Sébaco. 1954 – 1976. Tahal, 1977.....	10
Tabla No.II.2. Litoestratigrafía del área de estudio.....	11
Tabla No.II.3. Resultados de las perforaciones exploratorias.Tahal,1977.....	18
Tabla No.IV.1. Datos de Transmisividad Valle de Sébaco.....	36
Tabla No.IV.2. Datos de Conductividad Hidráulica.....	39
Tabla No.IV.3. Promedios Mensuales de Precipitación de las Estaciones ubicadas en el Valle de Sébaco.....	50
Tabla No.IV.4. Promedios Mensuales de ETP de las Estaciones ubicadas en el Valle de Sébaco .....	50
Tabla No.IV.5. Recarga según datos de pruebas de infiltración .....	51
Tabla No.IV.6. Recarga Total en todo el valle.....	51
Tabla No.IV.7. Distribución de la recarga por contenido de Tritio .....	52
Tabla No.IV.8. Valores de recarga por tipo de suelo.....	53
Tabla No.IV.9. Infiltración a través del cauce de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa.....	57
Tabla No.IV.10. Explotación en el año 2002.....	58
Tabla No.IV.11. Condiciones de explotación y recarga de retorno por riego.....	58
Tabla No.IV.12. Explotación del campo de pozos con el caudal recomendado por tipo de bomba, por 10 hrs. De bombeo.....	59
Tabla No.IV.13. Demanda máxima de agua potable año 2005.....	60
Tabla No.IV.14. Demanda máxima de agua potable año 2010.....	59

Tabla No.IV.15. Características físicas del cauce del río Viejo.....	65
Tabla No.IV.16. Características físicas del cauce del río Grande de Matagalpa.....	66
Tabla No.V.2. Datos de entrada al modelo.....	72
Tabla No.V.3. Comparación Recarga calculada vs. Recarga de Calibración.....	75
Tabla No.V.4. Valores de Conductividad Hidráulica para la calibración del modelo.....	77
Tabla No.V.5. Balance Hídrico Subterráneo.....	79
Tabla No.V.6. Resumen de los Errores obtenidos para las diferentes épocas simuladas.....	83
Tabla No.V.7. Balance Hídrico Subterráneo para las diferentes épocas simuladas.....	83
Tabla No.V.8. Recarga utilizada para el análisis de Sensibilidad del Modelo.....	88
Tabla No.V.9. Resultado del Análisis de Sensibilidad.....	88
Tabla No.V.10. Resultados del Balance Hídrico del Modelo con la Explotación del Campo de Pozos de Chagüitillo.....	91
Tabla No.V1.1. Balance Hídrico Calculado por el Programa de Modelo.....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura No.II.1. Ubicación Geográfica del Valle de Sébaco y su Cuenca de Captación Superficial.....	7
Figura No.II.2. Geomorfología del área de estudio.....	9
Figura No.II.3. Mapa Geológico.....	12
Figura No.II.4. Tipo de Suelo. ....	13
Figura No.II.5. Uso Potencial del Suelo.....	15
Figura No.II.6. Uso Actual del Suelo.....	16
Figura No.II.7. Superficie Piezométrica del Valle de Sébaco.1970.....	20
Figura No.IV.1. Extensión y Geometría del Acuífero.....	31
Figura No.IV.2. Distribución de las Capas Permeables en el Acuífero.....	33
Figura No.IV.3. Peril Transversal a lo largo de la Carretera San Isidro-Sébaco.....	34
Figura No.IV.4. Puntos de localización de las Pruebas de Bombeo.....	37
Figura No.IV.5. Distribución de las Conductividades Hidráulicas Valle de Sébaco..	41
Figura No.IV.6. Unidades Hidroestratigráficas Acuífero Valle de Sébaco.....	42
Figura No.IV.7. Mapa de elevación del Basamento Impermeable.....	44
Figura No.IV.8. Patrón de Flujo Regional.....	45
Figura No.IV.9. Representación de la Profundidad de los pozos en el Valle.....	46
Figura No.IV.10. Superficie Piezométrica. Abril 2002.....	48
Figura No.IV.11. Distribución de la Recarga por el método de Tritio.....	52
Figura No.IV.12. Distribución de la Recarga Natural. Método Schosinsky-Losilla ...	54
Figura No.IV.13. Distribución de la Red de Drenaje del Valle .....	56

Figura No.IV.14. Dirección de la Descarga del Acuífero .....	61
Figura No.V.1. Dominio del Modelo y Distribución de la Malla .....	63
Figura No.V.2. Capas del Acuífero para el Modelo Matemático.....	64
Figura No.V.3. Condiciones de Frontera del Modelo.....	67
Figura No.V.4. Zonas de Recarga Preferencial del Acuífero. Datos de Entrada al Modelo.....	68
Figura No.V.5. Distribución de la Conductividad Hidráulica del Acuífero. Datos Iniciales de Entrada al Modelo.....	69
Figura No.V.6. Zonas de Recarga utilizadas en la Calibración del Modelo.....	76
Figura No.V.7. Distribución de las Conductividades Hidráulicas utilizadas en la Calibración del Modelo.....	78
Figura No.V.8. Comparación Superficie Freática Simulada y Observada .....	87
Figura No.V.9. Zona de Captura del Campo de Pozos de Chagüitillo.2005 .....	90
Figura No.V.10. Zona de Captura del Campo de Pozos de Chagüitillo.2005.....	90
Figura No.V.11a. Zona de Captura del Campo de Pozos de Chagüitillo. Vista en tres dimensiones.....	90
Figura No.V.11b. Zona de Captura del Campo de Pozos de Chagüitillo. Sección transversal.....	91
Figura No.X.1. Esquema General de Manejo de la Cuenca Hidrológica del Acuífero del Valle de Sébaco.....	106

## LISTA DE GRAFICOS

Gráfico No.IV.1. Correlación entre la Profundidad de los Pozos y la Transmisividad.....	38
Gráfico No.IV.2. Correlación de la Profundidad de los Pozos y las Conductividades Hidráulicas.....	39
Gráfico No.V.1. Calibración de carga hidráulica para le época natural. 1970.....	80
Gráfico No.V.2. Calibración de Carga Hidráulica Epoca 1980-990.....	82
Gráfico No.V.3. Calibración de Carga Hidráulica . Año 2002.....	82
Gráfico No.V.4. Balance Hídrico Subterráneo para las Diferentes Epocas .....	84
Gráfico No.VI.1. Balance Hídrico Calculado por el Programa de Modelo.....	94
Gráfico No.VII.1. Resultados de la Simulación Campo de Pozos de Chagüitillo y Recarga Máxima .....	98

## RESUMEN

El Valle de Sébaco, de 263.33 Km<sup>2</sup> de extensión, forma uno de los principales acuíferos del país. Su cuenca de captación superficial se extiende en aproximadamente 652.79 Km<sup>2</sup>. Tradicionalmente se ha irrigado los arrozales del Valle con las aguas del acuífero y las del Río Viejo; actualmente ha sido la solución para abastecer de agua potable a la ciudad de Matagalpa. El estudio de Tahal Consulting, basado en un modelo matemático en 1977, proyectó para el año 2007 (período de 30 años), el descenso de los niveles freáticos hasta 30 metros, tomando como referencia los niveles de 1970. Desde ese tiempo, no se ha contado con instrumentos que expliquen y simulen las condiciones del acuífero, para con esta comprensión lograr su correcto aprovechamiento y protección.

Con el fin de contar con herramientas que apoyen el enfoque actual de gestión integrada de cuencas, se ha desarrollado, en este trabajo, el modelo matemático hidrogeológico, que permitirá evaluar el sistema acuífero, constituyéndose en una herramienta de análisis para los planes de gestión del recurso hídrico. Se definió el modelo conceptual del Acuífero, encontrándose un alto grado de complejidad en la distribución de los parámetros hidráulicos, características determinadas por la génesis variada y distribución de las capas permeables.

Con el programa de modelo Visual Modflow; se simuló, las condiciones del acuífero en estado estacionario. El año 1970 se tomó como condición natural y los años 1980-1990, 2000, sirvieron para la verificación del modelo. Se realizó la simulación para la predicción de los años 2005 y 2010. El error promedio de calibración logrado oscila entre 5 y 9%.

Se determinó que los niveles actuales han sido mantenidos debido a la recarga de retorno por riego, ya que la recarga directa por precipitación es insuficiente. Esta situación ha deteriorado la calidad del acuífero. Simulando, con el campo de pozos de abastecimiento para Matagalpa, un incremento de 25% en la recarga de calibración, se logran mantener los niveles actuales, lo que indica que resulta necesaria la gerencia de la cuenca dirigida al aumento de la recarga, para detener el rebajamiento de los niveles actuales.

Los datos del modelo matemático, están organizados de forma tal, que se puede alimentar el modelo con información nueva, aumentando de este modo la confiabilidad y grado de exactitud de las predicciones realizadas.

Como parte de la visión integral, se ha evaluado la intervención humana causante del grado de deforestación y erosión de suelos en las laderas de montaña que rodean el valle, lo que se traduce en una menor recarga lateral al acuífero. A partir de esta evaluación y los resultados del modelo, se proponen lineamientos generales para el Plan de Gestión del Acuífero del Valle de Sébaco.

## I. INTRODUCCION

La Planificación y el manejo de los recursos hídricos subterráneos, implica tomar decisiones que modifican el estado del sistema. Para esto, el conocimiento de las características del acuífero, su ocurrencia y dinámica, así como la evaluación de su potencial, es de vital importancia en la toma de decisiones concerniente al uso racional del agua; principalmente cuando revisten importancia económica nacional. El Programa de Maestría en Ciencias del Agua, con énfasis en Calidad de Agua del CIRA – UNAN, contempla como objetivo principal, contribuir al desarrollo científico universal, formando profesionales, mediante la investigación aplicada a problemas de Recursos Hídricos del país.

La economía de Nicaragua está basada en su producción agropecuaria, esto significa, entre otras cosas, que una gran parte de su territorio ha sido incorporado a los diferentes sistemas de producción vegetal y animal, que componen nuestra agricultura. Como actividad económica, la agricultura se basa en la utilización extensiva e intensiva del recurso suelo, y requiere además del recurso agua; ya sea en sistemas de secano (que depende del régimen de lluvias) o de riego.

Se han formulado numerosos proyectos agrícolas en todas las zonas potencialmente productivas. Una de éstas, es el valle de Sébaco, planicie intramontana, ubicada entre las montañas de la región Central en el departamento de Matagalpa. Es parte de las zonas de mayor desarrollo agrícola del país, donde, actualmente se produce arroz y hortalizas y se utiliza el agua del acuífero y de los dos ríos Viejo y el Grande de Matagalpa, que circulan sobre el valle.

El valle de Sébaco está compartido por tres municipios del departamento de Matagalpa: Sébaco con una población aproximada de 28,942 habitantes, San Isidro con 16,094 habitantes y Ciudad Darío con una población aproximada de 35,871 habitantes, la que está principalmente localizada en las cabeceras municipales.

[www.pinoleros.com](http://www.pinoleros.com)

Algunas investigaciones hidrogeológicas importantes se han llevado a cabo, con el objetivo de evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos en este valle con la

conclusión que los primeros horizontes del acuífero, se agotarían en los próximos 30 años con el ritmo de explotación de entonces (Tahal, 1977).

Las condiciones actuales de desarrollo económico y el crecimiento de la población, que demanda más disponibilidad de agua, requieren la aplicación de técnicas modernas de investigación, que permitan explicar la dinámica del acuífero con mayor precisión.

En este contexto, los modelos hidrogeológicos matemáticos aplicados, permiten simular el comportamiento del acuífero, calcular las reservas de agua, así como predecir su comportamiento futuro, a nuevas extracciones. Esto los convierte en una herramienta importante en la planificación del uso del agua. Considerando lo anterior, se ha realizado la modelización matemática del Acuífero del Valle de Sébaco, implementando un modelo numérico tridimensional denominado Visual Modflow, el cual ha sido ampliamente utilizado en otras áreas a nivel internacional con resultados satisfactorios. En Nicaragua se ha usado en una Subcuenca del río Posoltega (INETER, 2000).

La aplicación del modelo matemático hidrogeológico, ha dado como resultado inicial la reproducción de la dinámica natural del acuífero (1970). Se reprodujeron las épocas de extracción de 1980 – 1990 y 2000, para la verificación del modelo. Para la simulación de escenarios futuros se reprodujeron las condiciones de bombeo del campo de pozos de Chagüitillo.

Con este trabajo, se tiene el primer paso para simulaciones específicas de explotación actual y futura. La automatización de los datos del acuífero en un modelo matemático permitirá alimentarlo con nueva información, lo que aumentará la confiabilidad del estudio. A partir de estos resultados se han preparado estrategias para la recuperación del acuífero.

La simulación efectuada en el campo de pozos de Chagüitillo puede servir de guía para AMAT (Acueductos y Alcantarillados de Matagalpa), en cuanto a las acciones a tomar para el sostenimiento del proyecto. Las estrategias planteadas, pueden ser consideradas en los planes de manejo de Recursos Hídricos por los entes encargados.

## **I.1 Antecedentes**

Como ya se mencionó anteriormente, la región es principalmente agrícola, para lo que utiliza el agua del acuífero, mediante la extracción por pozos, especialmente en la parte norte y central del Valle, complementado con las aguas superficiales de los ríos que corren sobre el valle.

Tahal Consulting (1977), implementó un modelo matemático para la simulación del comportamiento del acuífero y la predicción de explotación, mediante la solución de las ecuaciones del escurrimiento en células rectangulares de 1 x 1 Km., denominado el modelo de TAHAL. En este trabajo se efectuó la corrida del modelo en estado estacionario, en el que las condiciones iniciales fue el nivel de los años 1960 -1970, y la simulación de los períodos de explotación para los próximos 30 años (1990). Se calculó que al ritmo de explotación de 35MMC, el descenso del acuífero después de 30 años sería de 20m, en la parte alta y menos de 10m en la zona de descarga, con la posibilidad que los pozos someros se sequen sin efectos significativos en la zona de descarga del acuífero.

El balance hídrico subterráneo anual calculado en el estudio de TAHAL fue: Recarga - 41MMC incluida la recarga de retorno por riego, la descarga por el río Grande de Matagalpa - 16MMC y por río Viejo - 5MMC. La descarga por extracción de pozos a esa fecha fue de 20MMC. El potencial de aguas subterráneas se estimó en 35MMC/año, incluyendo todos los usos del agua, con el aprovechamiento de la salida por los ríos.

Plata A. (1988), realizó el Estudio Isotópico del Valle de Sébaco, estimándose las reservas del acuífero en 740 MMC, asumiendo una porosidad de 0.25. La recarga anual del acuífero calculada a partir del contenido de tritio fue de 4.4 MMC/año. Adicionando a estos 4 millones y suponiendo un sistema mezclado se habría extraído hasta 1986, el 42% del tritio termonuclear infiltrado. La recarga moderna total para el acuífero sería entonces igual a 7.5 MMC/ año.

La explotación del acuífero puede decirse que comenzó en 1970, con los primeros pozos ubicados sobre la carretera San Isidro-Sébaco. La tasa de extracción a finales de los 80, era del orden de 40MMC/año, (Plata A. 1988). Para esta fecha el

rebajamiento de los niveles era de 10m en la parte norte del valle, mientras que la parte sur no mostraba cambios significativos.

Recientemente, se ha perforado un campo de pozos en Chagüitillo, ubicado en la parte noreste del valle, la extracción de agua abastecerá a la ciudad de Matagalpa, con 100,000 habitantes. Este trabajo se realizó basado en las investigaciones antes mencionadas, no se consideran las consecuencias en el nivel del acuífero al comenzar el bombeo.

En el estudio de Plata A. (1977), se detectó un foco termal, en el que se presume ascenso de aguas profundas. En mayo de 1996 a partir de un caso clínicamente sospechoso de intoxicación crónica por arsénico, varios dermatólogos de la Academia Nicaragüense de Dermatología, realizaron una investigación en el campo, con el objetivo de determinar la causa de esa afección, verificando que se debía a la presencia de arsénico en el agua de pozo de las comunidades El Zapote y aledañas.

El estudio inédito de González R. (2002), reporta residuos de agroquímicos (Fenthion, Methylparatión, etc), en muestras de aguas de pozos de explotación, que sobrepasan la norma de potabilidad.

## **I.2 Definición del Problema y Justificación del Estudio.**

La concentración de la población del país sobre las regiones Pacífico y Central, origina ciertas presiones sobre los recursos hídricos, dados los niveles de explotación y contaminación en algunas áreas. Por ejemplo, se han creado conflictos de intereses para extracciones de agua para abastecimiento y riego, en Estelí y entre extracciones de agua para generación hidroeléctrica y riego, en el Valle de Sébaco.

En atención a dichos problemas, se encaminan acciones para actualizar el marco jurídico y establecer las instancias administrativas del manejo de los recursos hídricos, bajo criterios de aprovechamiento y gestión integrada; para lo cual se requiere el inventario de los recursos y su evaluación detallada.

Los resultados de los estudios anteriores en el Valle de Sébaco, indican que se está extrayendo agua de las reservas del acuífero sin un debido control. Tomando en cuenta que la extracción a finales de los años 80 fue de 40MMC/año y el potencial de agua para riego se había estimado en 35MMC/año, incluyendo la explotación de las reservas, se muestra claramente la sobreexplotación del acuífero, de acuerdo a esas consideraciones.

Los diferentes usos del recurso hídrico superficial y subterráneo en el valle, han generado una serie de preocupaciones entre la población, acerca del agotamiento de las reservas del agua. La puesta en marcha del campo de pozos de abastecimiento para la ciudad de Matagalpa, se ha sumado a estos conflictos y ha generado las siguientes interrogantes:

- Sostenibilidad del Proyecto para los 25 años propuestos de abastecimiento a la ciudad de Matagalpa.
- Afectación del bombeo del campo de pozos de Chagüitillo al Sistema Acuífero Valle de Sébaco.

Los resultados del modelo, obtenidos en este Proyecto de Tesis, pueden ser utilizados por las autoridades de ENACAL (AMAT en Matagalpa), debido a la simulación de extracción en el campo de pozos de Chagüitillo, a los agricultores del área por su constante preocupación de la productividad de sus pozos y consecuentemente las instituciones reguladoras y formuladoras de normas, leyes y políticas, concerniente a los recursos hídricos subterráneos.

Lo anterior, justifica la necesidad de un conocimiento profundo de las reservas del acuífero en las condiciones actuales, mediante un estudio hidrogeológico a detalle, así como la implementación del modelo matemático, para la predicción de su comportamiento. Estos resultados pueden ser usados para una buena planificación del uso del recurso, dejando a todas las partes del valle a satisfacción y asegurando la buena marcha del desarrollo económico y social del país.

## **I.3 Objetivos del Proyecto**

### **1.3.1 Objetivo General**

El objetivo del estudio es aportar una herramienta operacional de análisis, del comportamiento actual y futuro del acuífero del Valle de Sébaco; cuyos resultados faciliten la concepción de estrategias de conservación y recuperación del Recurso Hídrico Subterráneo.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Elaborar el modelo conceptual del acuífero Valle de Sébaco.
- Reproducir la dinámica natural del acuífero y simular su respuesta a futuras acciones, mediante la implementación de un modelo matemático tridimensional.
- Proponer, a partir de los resultados del modelo, un plan de gestión del Recurso Hídrico Subterráneo que incluya estrategias de conservación, recuperación, y manejo racional y eficiente del agua subterránea.

## II. MARCO TEORICO

### II.1 Ubicación del Área de Estudio

El acuífero aluvial del Valle de Sébaco se localiza a unos 40km al norte del Lago de Managua

Se encuentra compartido entre los municipios de Sébaco, Ciudad Darío y San Isidro en el departamento de Matagalpa, específicamente entre las coordenadas UTM norte 1405836.05 - 1432566.71 y este 581536.55 - 600880.20. La cuenca de captación superficial se extiende desde las coordenadas norte 1401162.86 - 1436783.79 y este 574038.90 - 606706.63. (Fig.II.1).

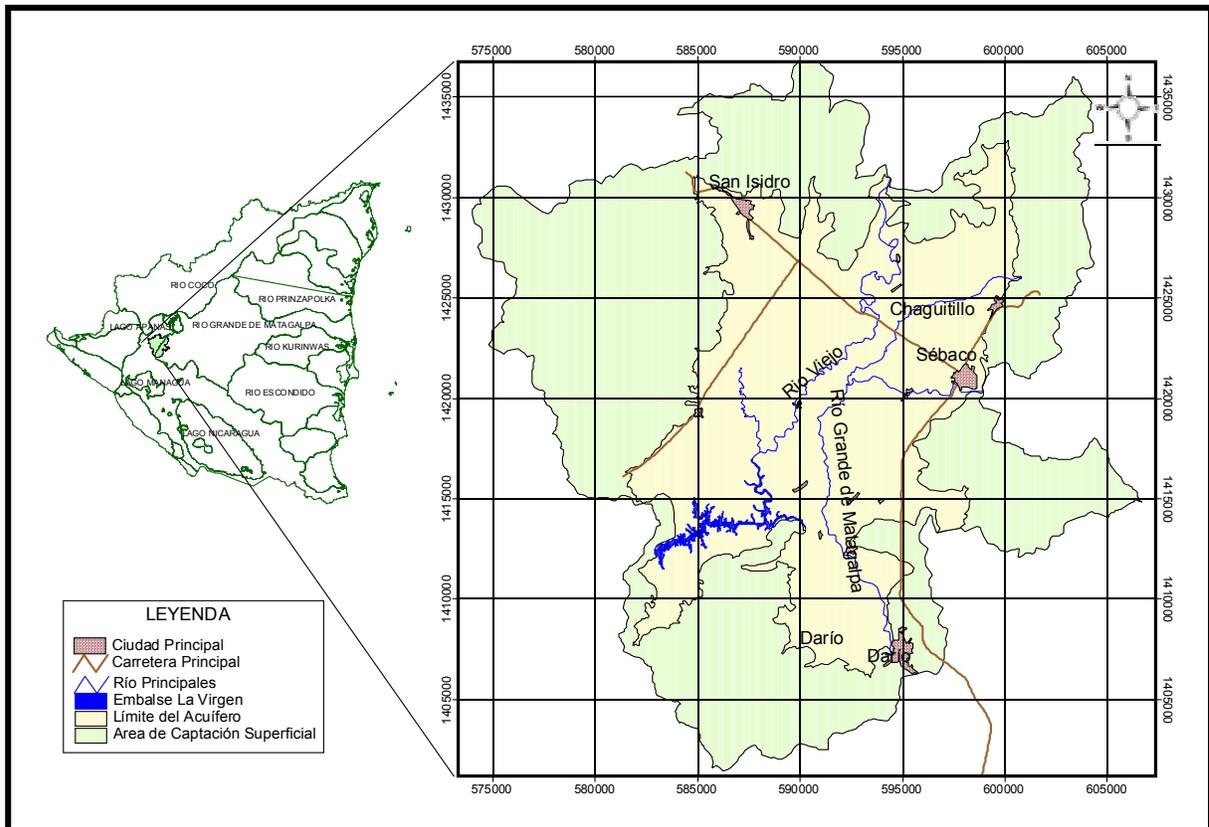


Fig. No. II.1. Ubicación Geográfica del Valle de Sébaco y su Cuenca de Captación Superficial

## **II.2 Geomorfología**

El relieve del valle de Sébaco está determinado por la litología y la tectónica de la región geomorfológica Tierras Altas del Interior, en el centro del país. Las rocas del entorno han sufrido movimientos tectónicos regionales y locales, por lo que se distingue, una serie de bloques separados entre sí por fallas, que definen el cambio brusco de elevación entre las montañas y el valle. Los agentes erosivos del relieve han dado paso a la formación de algunas mesetas que corresponden a formaciones litológicas específicas.

El perímetro de captación superficial del valle de Sébaco es de 652.79 Km<sup>2</sup> aproximadamente. El valle en sí, es una extensa planicie formada de materiales aluviales con una extensión aproximada 263.33 km<sup>2</sup>.

Topográficamente se distinguen elevaciones de hasta 1,339m (Cerro La Punta en el extremo noroeste de la cuenca). La zona montañosa tiene su pié de monte a una altura de 480 m.s.n.m, dando paso a un área escarpada, que representa las fronteras del valle. Las menores elevaciones, de 430 m.s.n.m se localizan cerca del embalse La Virgen, al suroeste.

Los flancos este y oeste tienen pendientes de hasta 80%; al contrario de los límites norte y sur, que presentan un relieve más moderado, de lomas suaves, con pendientes de 30%. El Valle posee dos extensos cauces, por donde corren los ríos Viejo, al oeste, y el Grande de Matagalpa, al este. La Fig. No. II.2 resume los rasgos geomorfológicos del área.

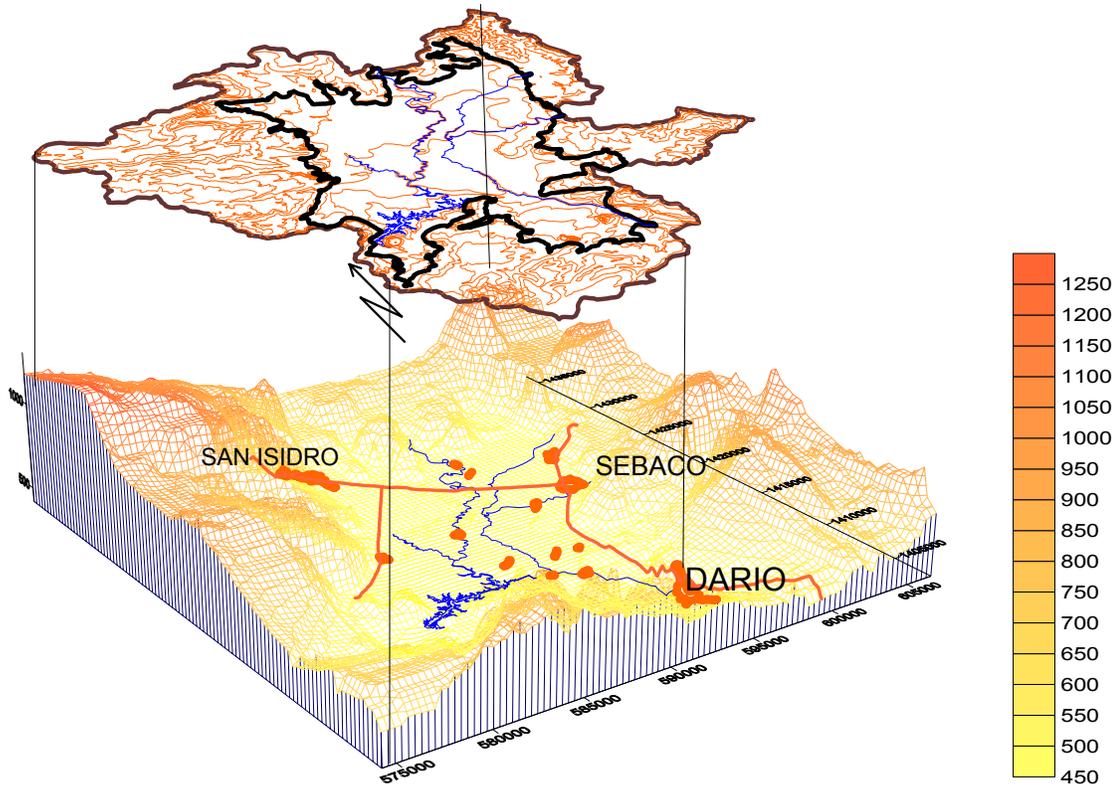


Fig. No.II.2 .Geomorfología del Area de Estudio

### II.3 Climatología

Los vientos húmedos que vienen del Caribe, chocan contra el bosque latifoliado de las montañas de Bosawás, en la región Atlántica, que colinda con las montañas del Valle; lo que determina en gran medida el clima del Valle de Sébaco.

El clima de la región se clasifica, según Köppen, como de sabana tropical. La temperatura media anual, que oscila entre los 21° y 30°C, en algunos casos alcanza valores extremos de 41° C. La precipitación pluvial varía de un mínimo de 800 mm, en el centro del valle a un máximo de 2,000mm en la zona montañosa, durante los meses de mayo a octubre. La estación seca es de noviembre a abril.

La Tabla No.II.1, muestra los valores promedios ponderados de la precipitación media en las estaciones Sébaco, Sn. Isidro y Sta. Bárbara, las cuales están ubicadas en tres de los extremos del valle, por lo tanto son representativas del clima dentro del valle, hacia las montañas la precipitación promedia aumenta hasta un máximo de 1200mm. La precipitación que cae sobre el valle de Sébaco es

relativamente poca en comparación a otras zonas del país, donde alcanza hasta 2000 y 3000 mm anuales, aún en la Región Central donde se ubica el valle.

Aunque se han registrados eventos extremos, el comportamiento de los parámetros climáticos en el área de estudio, es prácticamente constante para las dos épocas: las épocas seca y lluviosa.

Tabla No.II.1 Promedios Mensuales de Precipitación Pluvial en el Valle de Sébaco. 1954-1976, Tahal, 1977

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
PP(mm)	5	3	7	27	129	205	80	89	203	216	41	5	1010

## II.4 Geología

### 2.4.1 Geología Histórica y Estructural

Los datos geológicos generales fueron tomados del mapa presentado en el estudio de Tahal Consulting (1977) y reformado en este trabajo. La Fig. No.II.3, refleja los rasgos geológicos más importantes del área.

La formación de las montañas que rodean el valle aluvial de Sébaco, se debe en primer lugar al intenso vulcanismo del terciario y los movimientos orogénicos posteriores, que produjeron un intenso fallamiento agrupados en tres sistemas: Fallamiento de rumbo noroeste – suroeste; un segundo, de rumbo noreste-suroeste y finalmente uno de rumbo norte sur (éstas son las mas recientes). Este fallamiento ha creado una morfología de bloques escalonados, con un buzamiento general en dirección a la Depresión Nicaragüense. Además, estas fallas han creado la forma actual del valle parecida a un paralelogramo.

La depresión en la que se formó el valle está rellena por materiales aluviales y coluviales, provenientes de las montañas aledañas.

- **Estratigrafía**

Dos unidades estratigráficas predominan en el área de estudio, las rocas de la formación volcánica terciaria y los sedimentos del cuaternario, formados a partir de la desintegración mecánica y química, el arrastre y acumulación de las rocas terciarias.

- *Volcánico Terciario*

Estas rocas representan los bordes laterales y el fondo del acuífero y se agrupan de la siguiente manera:

- *Rocas del Plioceno:*

Coyol Inferior: litológicamente constituidas por ignimbrita dacítica, tobas (Tmcd) aglomerado y andesita (Tmca).

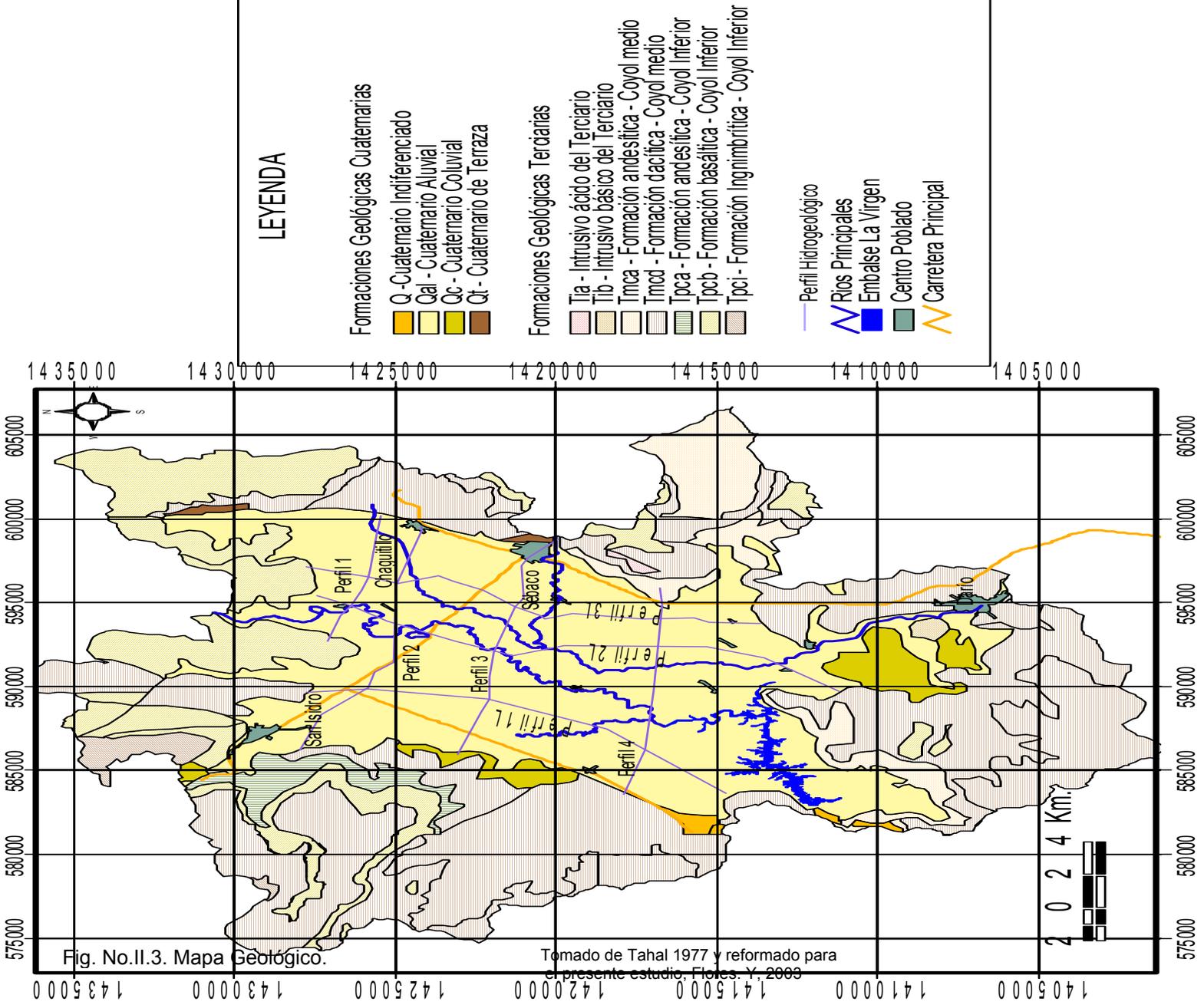
Coyol Superior: compuestos por ignimbritas (Tpci), basaltos (Tpcb), aglomerados (Tpca).

- *Cuaternario Aluvial*

Los depósitos aluviales son los que principalmente han rellenado la cuenca tectónica que forma el acuífero del Valle de Sébaco, estos se encuentran indiferenciado en un espesor de aproximadamente 140m (Tahal Consulting, 1977). Litológicamente están constituidos por arcillas, limos, arenas de diferente diámetro, gravas y bolones. La Tabla No.II.2 presenta la estratigrafía de la cuenca del Valle de Sébaco

Tabla No.II.2. Litoestratigrafía del Área de Estudio

<b>LITOESTRATIGRAFIA DEL AREA DE ESTUDIO</b>			
<b>Edad</b>	<b>Espesor</b>	<b>Formación</b>	<b>Litología</b>
Cuaternario	Aprox. 140m	Aluvial	Arena, grava, limo y arcilla
Pleistoceno	-	Grupo Coyol Superior	Ignimbritas, basaltos y aglomerados
Mioceno	-	Grupo Coyol Inferior	Ignimbrita dacítica, toba, aglomerado y andesita



## II.5 Suelo

### 2.5.1 Clasificación taxonómica

Los tipos de suelo que predominan en la cuenca del valle de Sébaco están representados en la Fig. No.II.4. La estructura y textura de los suelos es un factor muy importante para determinar el agua que recarga al acuífero, así como el tipo de actividad que sobre éstos se puedan realizar.

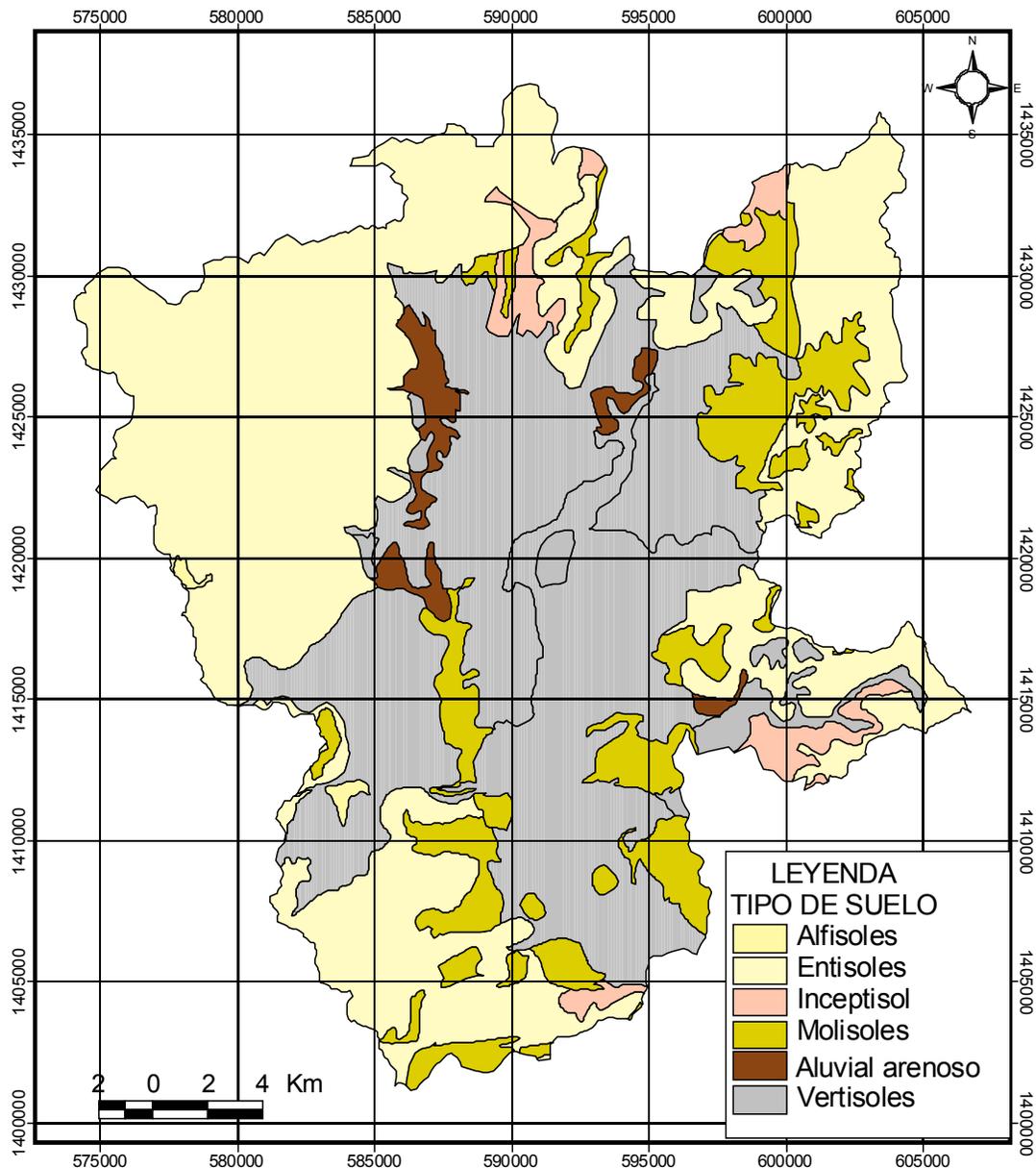


Fig. No.II.4 Tipo de Suelo

INETER-NORAD.1998. y reformado para el presente estudio. Flores Y. 2003

Los suelos de las partes altas son de poco espesor y se formaron a partir de la meteorización de las rocas (Inceptisoles, Entisoles).

Los suelos del valle han sido desarrollados a partir de los materiales que forman el relleno y su horizonte puede tener hasta 1m de espesor.

En la parte central del valle predominan los suelos arcilloso – limosos, clasificados como vertisoles. En los flancos oriental y occidental, en las entradas de los ríos al valle y sobre el lecho de éstos, se presentan suelos arenosos, con partículas de arena fina a suelos de textura gruesa; en éstos se realiza la recarga directa al acuífero y la proveniente de las montañas como escorrentía superficial.

### **2.5.2 Uso Potencial del Suelo**

El 35.4% de la superficie del Valle, está formado por suelos de calidad para los cultivos tradicionales (sorgo, algodón, hortalizas, etc.), clasificándose como suelos de clase A. El 36% son de calidad moderada (clase B), pero aptos para cultivo de maíz, frijol, arroz, sorgo, pastos, tomate, algodón, etc. El 26.4% son de pobre calidad (clase C), pero que pueden utilizarse para cultivo de pastos y arroz. La mayor parte del potencial de la zona montañosa es de suelos forestales. La Fig. No.II.5, muestra el potencial agropecuario de los suelos (INETER-NORAD, 1997).

### **2.5.3 Uso Actual del Suelo**

En la actualidad casi el 80% del área agrícola está cultivado de arroz de inundación, el restante (20%) con hortalizas, pastos o simplemente se presenta con arbustos.

Foto No.1. La zona alta presenta bosque secundario La Foto No.1 y la Fig. No.II.6 representa el Uso del Suelo (INETER-NORAD, 1997)



Foto. No.1 Vista del Campo de Pozos de Chagütillo sobre los campos de arroz, al frente y al fondo en las montañas, se observan los suelos cubiertos de arbustos. (Marzo, 2002)





## **II.6 Aguas Superficiales**

### **– Ríos**

Las corrientes principales localizadas en el Valle de Sébaco son el río Viejo al este, y el río Grande de Matagalpa, al oeste. Ambos ríos tienen la característica que el caudal base en condiciones naturales es bajo y se manifiesta únicamente en la salida del Valle.

Debido a la alimentación artificial desde el lago de Apanás, el río Viejo mantiene un caudal considerable todo el año, regulado por las necesidades de abastecimiento de la planta Centroamérica en Jinotega y la planta Santa Bárbara, en la esquina suroeste del valle, la que es alimentada por el embalse La Virgen. Este río descarga finalmente al Lago Xolotlán. No hay ríos que bajan de las montañas propias de la cuenca del valle.

Una parte del volumen abastecido por el lago de Apanás, es utilizado por los agricultores en su paso por el valle, lo que reduce el caudal de entrada al embalse La Virgen.

Los caudales medios del río Viejo equivalen a  $12.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ; el río Grande de Matagalpa fluctúa enormemente durante las dos estaciones, de enero a mayo mantiene un caudal de  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que durante la época lluviosa puede incrementarse hasta 10 veces este caudal, (Tahal Engineering, 1977).

## **II.7 Hidrogeología**

### **2.7.1 Medio Hidrogeológico**

El acuífero aluvial del Valle de Sébaco está compuesto de arenas y gravas, intercaladas con material fino. Tiene característica de semiconfinado, debido a la capa limo-arcillosa que lo sobreyace, presenta condiciones libres en algunas zonas de los bordes este y oeste del valle (Tahal, 1977).

Bajo la capa de material acuífero, se encuentra una capa de arcilla acumulada en condiciones lagunares, la que se presume sirva de basamento impermeable. Para este efecto Tahal (1977), realizó tres perforaciones exploratorias en las que se logró penetrar hasta la capa de arcilla, sobre el lecho rocoso. Se calcula un espesor total

de 140m, para estas tres capas. La Tabla No.II.3, muestra los resultados de estas perforaciones.

Tabla No.II.3. Resultados de las Perforaciones Exploratorias. Proyecto de Desarrollo Industrial Valle de Sébaco (Tahal, 1977)

Pozo Exploratorio	Profundidad del Basamento	Observación
PS - 1	67.05m hasta la capa de arcilla, no se penetró hasta la roca. Altura del basamento 382.03m	Se perforó hasta la profundidad de 125.27 m de los cuales los últimos 58.21m fueron de arcilla compacta
PS - 2	157.84m, se llegó hasta roca ignimbrita medianamente consolidada. Altura del basamento 299.99 m.s.n.m	Medianamente consolidada puede significar que posee permeabilidad media, lo que daría paso a flujos verticales ya sea ascendentes o descendentes
PS - 3	57.60m hasta la capa de arcilla compacta, luego sigue una capa de roca meteorizada. Altura del basamento 404.16 m.s.n.m	Se perforó aproximadamente 37 m de arcilla y roca meteorizada, aunque estas capas pueden considerarse como basamento, las características la ubican como rocas de permeabilidad secundaria con incidencia desde o hacia el acuífero.

### 2.7.2 Piezometría

Es común que las curvas de nivel piezométrico, reproduzcan la superficie topográfica o la dinámica del acuífero, cuando éstas han sido trazadas con datos confiables y exactos del punto de medición del nivel freático, con la salvedad que cuando la confiabilidad de los datos es baja o se trabaja con valores promedios, se puede también asumir que las líneas piezométricas representan las superficies piezométricas promedios de la zona.

Las superficies piezométricas del acuífero del Valle de Sébaco está condicionada por el medio hidrogeológico, representan además su dinámica, zonas de recarga y descarga. Las líneas paralelas a los bordes del valle indican entrada de agua por este borde, las líneas perpendiculares indican un borde impermeable.

La zona de recarga se distingue principalmente al norte del valle y en el borde occidental. La zona de descarga es al sur por el río Grande de Matagalpa en Ciudad Darío y por el embalse La virgen.

La Fig. No.II.7 representa el mapa de niveles estáticos del año 1970, el que se considera bajo condiciones naturales. Las mediciones para la realización de éste mapa se tomaron solamente en pozos excavados durante el mes de Abril, mes más seco, considerándose que los niveles estáticos han alcanzado su punto más bajo. El mapa de superficies piezométricas realizado por Tahal Consulting Ltd., (1977) a partir de pozos excavados, no presenta los datos utilizados para tal fin.

En los pozos monitoreados por Catastro e Inventario de Recursos Naturales, durante 8 años (1968-1976), se observó que la variación estacional de los niveles oscila entre 0.2 y 0.8m.

### **2.7.3 Propiedades Hidráulicas**

A partir de los resultados de las pruebas de bombeo realizadas en el valle, han sido calculados los datos de transmisividad, los que oscilan desde 29 m<sup>2</sup>/día en los pozos de la zona de Ciudad Darío, hasta casi 4000 m<sup>2</sup>/día en la zona central del valle, sin que se observe una distribución uniforme de las transmisividades en toda el área (Tahal, 1977). No se especifica los datos de diseño del pozo ni la duración de las pruebas de bombeo.

En el estudio “El Agua Subterránea en el Área del Proyecto Hortícola del Valle de Sébaco”, (INETER, 1984), se obtuvo el coeficiente de almacenamiento de 0.22. Este valor se calculó con los datos de una única prueba de bombeo, con un pozo de observación. Los mismos se ubican en el área del campo de pozos de Chagüitillo.

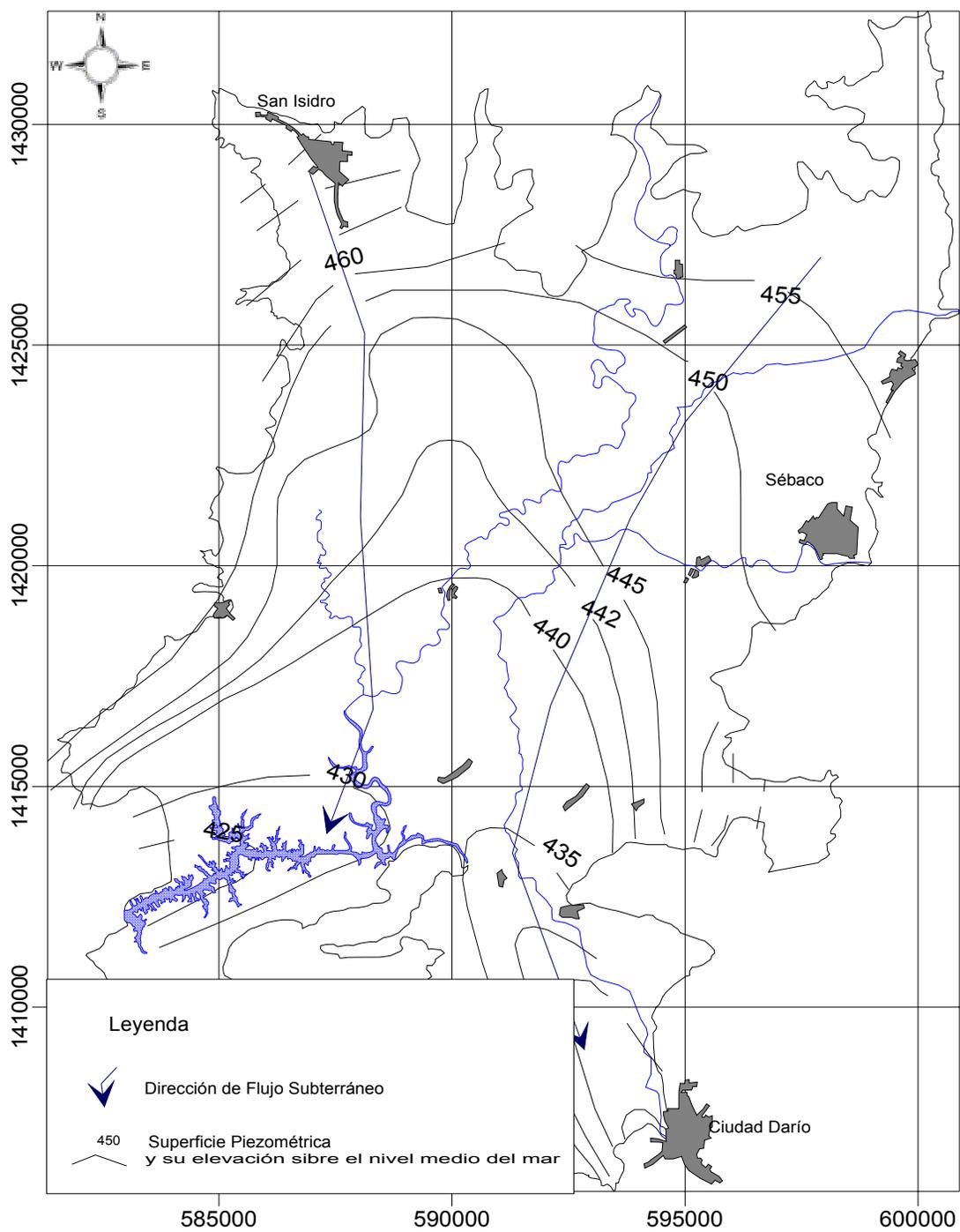


Fig. No.II.7 Superficie Piezométrica del Valle de Sébaco. 1970 Tomado de Tahal, (1977)

#### 2.7.4 Hidrogeoquímica

El estudio “Hidrología Isotópica del Acuífero Aluvial del Valle de Sébaco” (Plata A.,1988), con el objetivo de obtener información básica sobre las características hidrológicas del acuífero utilizando las siguientes técnicas:

- 1- Hidroquímica
- 2- Medida de los isótopos estables del agua deuterio ( $^2\text{H}$ ) y Oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ )
- 3- Medida del Tritio ( $^3\text{H}$ ) de origen termonuclear
- 4- Medida del Carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ )
- 5- Ensayos de flujos en pozos utilizando trazadores.

Los principales resultados de este estudio, relativo a las características físico-químicas generales del acuífero fueron:

- Existe un foco de termalismo residual en la mitad occidental del valle donde las aguas llegan a alcanzar temperaturas de hasta  $35^\circ\text{C}$ .
- Las aguas del acuífero aluvial son bicarbonatadas cálcico-magnésicas, de buena calidad química en cuanto a iones mayores se refiere. La conductividad a  $25^\circ\text{C}$  varía entre 200 y  $650\ \mu\text{S}/\text{cm}$ , presentándose las menores conductividades en el agua de los ríos y los pozos ubicados próximos a sus orillas, un foco de mayor conductividad coincide con el foco termal y otro que afecta a los mayores espesores permeables al noroeste de la ciudad de Sébaco. Las aguas de los pozos que se encuentran en los materiales calcáreos de la zona de Ciudad Darío son cloruradas sódicas y tienen una conductividad del orden de  $1500\ \mu\text{S}/\text{cm}$ .
- En la zona central del valle, donde los espesores permeables son menores, las aguas subterráneas tienen concentraciones más elevadas de iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ . Esto parece indicar que la mayor concentración de estos iones en la zona de Ciudad Darío, se relaciona con un mayor contenido en materiales arcillosos y por tanto una menor permeabilidad y mayor tiempo de permanencia del agua en el acuífero. Esto puede indicar una zona de descarga local en el área.

- La concentración de SiO<sub>2</sub> disminuye, por lo general, desde los bordes del Valle al interior, lo que parece estar relacionado con el mezclado de la recarga lateral con la procedente de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa. Un foco con mayores concentraciones de SiO<sub>2</sub> coincide con el foco de termalismo residual situado al este de San Isidro.

### **2.7.5 Condiciones de Recarga**

A este respecto se presentan de igual manera los resultados del estudio isotópico el cual concluye:

#### **- Origen de la recarga**

Hay dos fuentes de recarga principales al acuífero:

- Infiltración de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa

Esto ha sido comprobado mediante la hidrogeoquímica del agua, los ensayos de flujo y los análisis isotópicos realizados para determinar la edad del agua. Las concentraciones de los isótopos estables de <sup>18</sup>O y <sup>2</sup>H en los pozos cercanos al río e incluso un poco más allá de sus orillas son similares, con aguas enriquecidas en estos isótopos; particularmente el agua de los pozos cercanos al río Viejo; presentan concentraciones similares a la del embalse de Apanás que es de donde éste río se alimenta.

- Escorrentía superficial que llega al valle por los bordes del valle.

Algunos suelos permeables se localizan en la entrada de flujos superficiales de agua al valle (quebradas, escorrentía no encausada).

No se encuentran pozos con flujo vertical ascendente por lo que se descarta la recarga por fracturas o accidentes estructurales desde el basamento.

De igual manera, en el Proyecto de Desarrollo Industrial del Valle de Sébaco (Tahal, 1977), se identificaron las siguientes fuentes de recarga: desde los bordes del Valle, a través del lecho de los ríos, recarga directa y recarga de retorno por riego.

### – Volumen de la Recarga

La recarga total calculada mediante las técnicas isotópicas fue de 7.5 MMC anuales, de los cuales casi el 80% se identificó, de acuerdo a la concentración isotópica de Tritio, como aporte de los ríos Viejo y Grande; el resto como recarga directa de las precipitaciones.

El volumen de la recarga calculado en el estudio de Tahal (1977), se desglosa a continuación:

Recarga en los bordes del Valle.....	20MMC/añual
Recarga de Retorno por riego.....	8MMC/añual
Recarga Directa por lluvia.....	5MMC/añual
Infiltración por el lecho de los ríos.....	3MMC/añual
Infiltración por el embalse la Virgen.....	5MMC/añual
<b>Recarga Total.....</b>	<b>41MMC/añual</b>

### 2.7.6 Condiciones de Descarga

#### – Descarga Natural

La descarga natural del acuífero aún no ha sido debidamente identificada. En el estudio de Tahal (1977), se realizó un mapa piezométrico donde se definen dos zonas de descarga: una por el río Viejo y otra por el río Grande de Matagalpa. Fig.No.II.7.

Los estudios isotópicos contradicen la hipótesis de descarga a través de Ciudad Darío, identificando la zona de descarga del acuífero por el río Viejo a través del embalse la Virgen y suponiendo una descarga a través de fallas.

#### – Descarga por Pozos de Bombeo

Debido a la fertilidad de los suelos del Valle y la productividad de los pozos, la perforación de éstos ha ido aumentando con el tiempo, para 1977 existían alrededor de 20 pozos que extraían un volumen aproximado de 20MMC/anuales (Tahal, 1977), actualmente existen más de 200 pozos perforados con un caudal total de extracción aproximado de 80MMC/anuales.

### III. DISEÑO METODOLÓGICO

Un modelo científico es una herramienta que reproduce el funcionamiento de un sistema natural, y cuyo objetivo es el estudio y el análisis del mismo bajo diferentes condiciones. Permite, así mismo, obtener una visión de conjunto de los procesos naturales que en éste pueden actuar y analizar la incidencia de cada uno de los factores o variables presentes, pudiendo predecir su comportamiento y respuesta cuando es sometido a unas situaciones de explotación determinadas.

El modelo matemático hidrogeológico, permite determinar el comportamiento del acuífero, calcular el balance hídrico subterráneo, abatimientos y zonas de captura, modificar el sistema de un estado a otro mediante la elaboración de escenarios simulados (por ejemplo incremento de los caudales de explotación), puede modelarse obteniendo como resultado un escenario simulado que puede resultar factible o no.

El análisis de las simulaciones ayudan a la toma de decisiones, (como la implementación del campo de pozos en Chagüitillo con extracciones que simulen la demanda máxima futura o el aumento de la extracción para riego que conllevan al uso sostenible del recurso hídrico), mediante la formulación de políticas adecuadas, que utilizan los resultados del modelo matemático entre otras herramientas.

Existen diferentes tipos de modelos matemáticos, se toma para el presente estudio la clasificación de interés: los modelos numéricos.

En los modelos digitales o numéricos, existen dos aproximaciones o métodos básicos mediante los cuales puede resolverse la ecuación de la continuidad:

- Modelos de resolución mediante diferencias finitas.
- Modelos de resolución mediante elementos finitos.

Para el presente estudio se trabajará con el modelo de resolución mediante diferencias finitas MODFLOW y la interfase de Visual Modflow, por considerarse un modelo sencillo y eficientemente comprobado en numerosos acuíferos.

En Nicaragua se implementó este modelo para una cuenca piloto en el estudio del Acuífero de Occidente. (MAGFOR – INETER, 1999 – 2001).

El desarrollo del modelo matemático se realiza en las siguientes etapas:

**1. Establecer el propósito del modelo que determinará la ecuación gobernante y el programa numérico a seleccionar.**

Como ya se mencionó, el propósito es contar con una herramienta operacional de análisis que explique la dinámica del acuífero, lo que permitirá establecer estrategias de uso del recurso.

Se utilizará el programa Visual MODFLOW, un modelo en diferencias finitas que permite resolver de forma numérica la ecuación de flujo estacionario en tres dimensiones obtenidas a partir de la ley de Darcy y la ecuación de la Continuidad.

Se justifica la implementación de un modelo tridimensional debido a la heterogeneidad del acuífero, propias de los acuíferos aluviales, donde se considera que los movimientos verticales, son en mucha mayor medida, menor que los movimientos horizontales.

*– Estado constante del flujo de agua subterránea en 3D*

El modelo se realizó en estado estacionario, debido a los pocos datos con que se cuenta para la realización de un modelo en estado transitorio o no estacionario, en tal caso se realiza un modelo quasi – estacionario.

La ecuación de flujo tridimensional de aguas subterráneas en estado estacionario, en un medio poroso, heterogéneo y anisotrópico, viene dada por la expresión:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm w = 0$$

Donde:

$K_x, K_y, K_z$ : Componentes del tensor de conductividad hidráulica (m/día)

$dh$  – diferencia de carga hidráulica (m)

$w$  : flujo volumétrico de entrada: (+) como recarga o (-) como descarga (m<sup>3</sup>/día)

$x, y, z$ : dirección en el espacio de las coordenadas cartesianas (dirección del flujo).

Donde la relación entre las propiedades del medio poroso, el gradiente hidráulico y el flujo de agua subterránea, se da por la ley de Darcy para cada dirección de flujo, horizontal lateral, horizontal transversal y vertical.

$$q_y = K \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$q_x = K \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_z = K \frac{\partial h}{\partial z}$$

$q_x, q_y, q_z$  – velocidad de Darcy en las diferentes direcciones

La ecuación se resuelve por medio del método de diferencias finitas, en donde las diferencias parciales  $\partial x, \partial y, \partial z$  son aproximadas a longitudes finitas  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ . El acuífero se divide en celdas de dimensiones establecidas  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , de manera que forman un conjunto de volúmenes finitos del acuífero.

El sistema de flujo de aguas subterráneas se discretiza por medio de una malla rectangular, donde el tamaño de una celda es muy pequeño comparado con el del acuífero, por lo que en el caso de un número infinito de celdas la solución es exacta. La Fig. No.III.1, representa el volumen elemental representativo para la simulación del acuífero

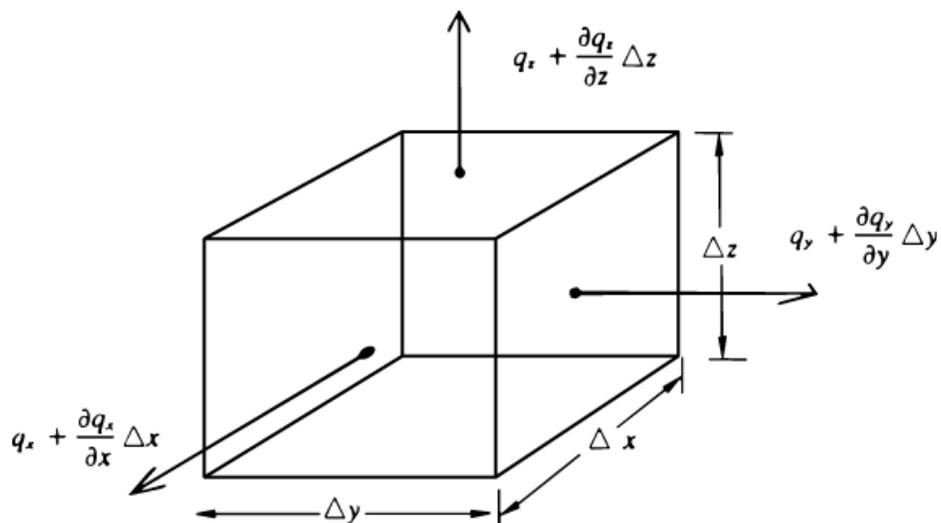


Fig. No.III.1.Volumen Elemental Representativo (REV, por sus siglas en inglés) del acuífero.

## **2. Desarrollo del Modelo Conceptual del sistema.**

El proceso metodológico para el diseño del modelo conceptual del acuífero del valle de Sébaco se dividió en las siguientes etapas:

### *a- Etapa preliminar*

Consistió en la recopilación de la información precedente, su procesamiento y análisis para una primera interpretación del modelo conceptual del acuífero. En esta etapa se definió las áreas para el reconocimiento de campo efectuada en la siguiente etapa.

### *b- Etapa de campo*

De la información recopilada en la etapa anterior, se definió algunas áreas, donde se debía complementar datos, esto incluyó:

- *Reconocimiento geológico, en la que se visitaron puntos claves de comprobación para el mejor entendimiento del medio.*
- *Levantamiento hidrogeológico: toma de datos de niveles estáticos del agua, y parámetros físico-químicos de campo, que ayudan a entender la dinámica del acuífero.*

### *c- Etapa del procesamiento de datos e interpretación de la información antecedente y de campo.*

En esta etapa se elabora el modelo conceptual, en el que identifican las unidades hidroestratigráficas y las condiciones de fronteras. Los datos de campo son ensamblados, incluyendo información acerca del balance hídrico y los datos necesarios para asignar valores a los parámetros del acuífero y las acciones a que está siendo sometido. Esta etapa debe combinarse con la verificación de campo.

## **3. Diseño del modelo**

En esta etapa se integran todos los componentes del modelo: fronteras, parámetros hidráulicos, recarga, datos de caudal de extracción, etc. Se preparan los mapas y datos en forma reconocida por el programa de modelo. Puede tomarse como la simplificación más aproximada de las condiciones naturales del sistema.

#### **4. Calibración y Verificación.**

Aquí se trata de reproducir las condiciones naturales de flujo y carga hidráulica. Se efectúa mediante la asignación de valores de parámetros hidráulicos dentro de un rango permisible, que satisfagan las condiciones observadas en el campo. Esto es posible también usando parámetros automatizados.

En el presente estudio se trabajó mediante prueba y error, con los rangos de datos obtenidos durante el procesamiento de la información, con datos existentes, recopilados en el campo, y en algunos casos con datos teóricos.

#### **5. Análisis de Sensibilidad**

La calibración del modelo está influenciada por la incertidumbre propia de la inexactitud de los parámetros. Aquí se utilizan los valores, máximos y mínimos de los valores hidráulicos, con el objetivo de determinar la afectación en la solución del modelo, trabajando con valores extremos; lo que puede realizarse con uno o la combinación de los parámetros.

#### **6. Predicción**

Una vez reproducida las condiciones naturales, se procede a la simulación de acciones futuras, mediante la puesta en marcha de explotación de nuevas obras en el acuífero para determinar el impacto sobre las condiciones actuales de éste.

#### **7. Presentación de resultados**

Aquí se presentan los datos obtenidos en el proceso, superficies freáticas, abatimientos, velocidad de flujo y el balance hídrico del acuífero, las condiciones de predicción.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSION**

### **IV.1 Condiciones ambientales de la Cuenca de Captación Superficial y el Acuífero del Valle de Sébaco**

El estudio de INETER-NORAD<sup>1</sup>, identificó regionalmente la situación de los recursos naturales en los departamentos de Matagalpa y Jinotega, en la que se diagnóstico el grado de deforestación y sub-utilización, que están sufriendo los suelos de la región.

De la Fig.No.II.5, puede apreciarse que la vocación de los suelos de la cuenca de captación superficial es predominantemente forestal; sin embargo la Fig.No.II.6, muestra que una gran parte de este territorio ha sido afectado por las actividades antropogénicas, principalmente agricultura y ganadería.

El trabajo de la OIM-HUD-Alcaldías (Darío-Sébaco, 2000)<sup>2</sup>, se realizó específicamente en los municipios de Ciudad Darío y Sébaco, donde se identificó, a detalle, la fuerte deforestación que sufren estos dos municipios, especialmente en el área de las montañas que rodean el Valle, debido a la extracción de árboles para leña y quema de bosques, para la incorporación de la tierra a las actividades agropecuarias.

La deforestación sufrida al incorporar éstas tierras a actividades agropecuarias, trae como consecuencia la pérdida de suelos, que al estar sin protección sufren una fuerte erosión. Debido a la poca profundidad de éstos, las precipitaciones podrían provocar su pérdida total, consecuentemente se pierde la posibilidad de crecimiento de árboles en la zona. Otra consecuencia de la pérdida de suelo es la disminución de la capacidad de infiltración y de esorrentía sub-superficial, que en este tipo de formaciones, constituye una fuente importante de recarga al acuífero.

Aunque el INAFOR, ha implementado algunos trabajos de reforestación, en la que se han plantado pinares en algunos lugares altos, la mayor parte de la cuenca de captación del valle, se encuentra sin cubierta forestal adecuada al tipo de suelo.

1-Estudio de Ordenamiento Territorial Matagalpa-Jinotega. INETER-NORAD, 1999

2-Plan Integral de Desarrollo Municipal Sébaco, Darío. OIM-HUD-Alcaldías.

## **IV.2 Caracterización del Acuífero**

El modelo conceptual del acuífero es la representación de sus características naturales, simplificado de forma tal, que pueda ajustarse al modelo numérico de manera que contenga la suficiente información para lograr su reproducción automatizada mediante un código de programa.

Los datos obtenidos durante la etapa de investigación, se han procesado en esta etapa, para la obtención del modelo conceptual.

### **4.2.1 Extensión y Geometría del Acuífero**

El acuífero tiene una extensión de 263.33 km<sup>2</sup> y un espesor aproximado de 110m, según se reveló en el pozo PS-2 (Tahal, 1977), el más profundo del área. La cuenca de captación superficial que drena hacia el valle mide 652.79 Km<sup>2</sup>.

Se ha tomado en cuenta toda la cuenca de captación superficial, ya que no se conoce con certeza, la influencia que ésta tiene en la alimentación o recarga al acuífero.

El acuífero del Valle de Sébaco, debido a su formación tectónica tiene la forma de un trapecio definido por un sistema de fallas que originaron un relieve de bloques escalonados, entre los cuales se formó, por sedimentación, el valle de Sébaco. Los bloques entre fallas forman montañas de rocas volcánicas terciarias las que se suponen impermeables cuando no han sufrido ninguna alteración.

Los pozos de los bordes del valle, generalmente alcanzan la formación rocosa a unos pocos metros, mientras que los pozos del centro se ha localizado por debajo de los 100m bajo el terreno. Esto supone que el hundimiento del bloque central se produjo a través de fallas inclinadas, con el hundimiento de un bloque central. La Fig.No.IV.1, muestra la forma de la cuenca de captación superficial y del acuífero en la parte baja.

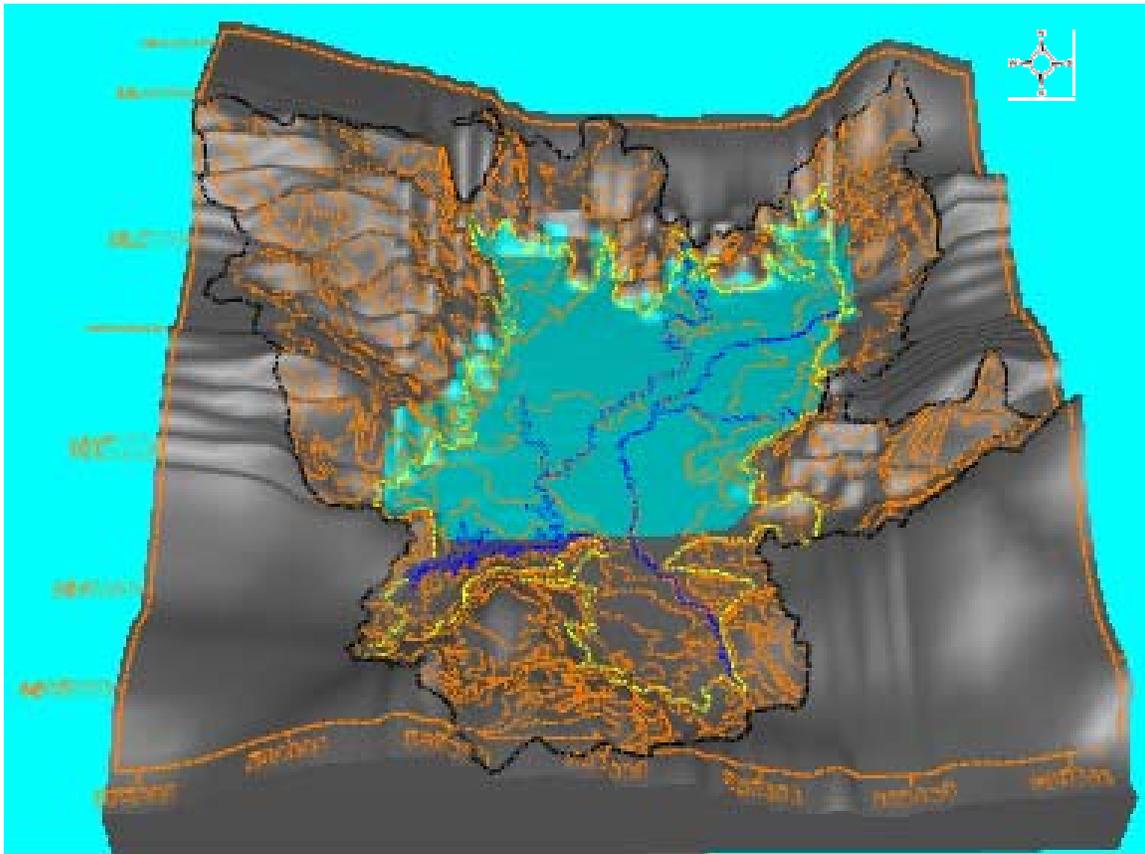


Fig.No.IV.1. Extensión y Geometría del Acuífero.

#### 4.2.2 Unidades Hidroestratigráficas

##### – Descripción de la litología del acuífero

Para la definición de la litología del acuífero se realizó el análisis de aproximadamente 100 registros litológicos de pozos, con los que se trazaron 4 perfiles transversales (oeste – este) y tres longitudinales (norte – sur). Anexo A y B.

El medio hidrogeológico está representado por materiales sedimentarios. Es un acuífero heterogéneo, con capas intercaladas de granulometría variada desde arcilla hasta gravas y bolones. No hay una distribución uniforme de estos materiales por lo que se considera que las fuentes de deposición fueron muy desiguales, entre éstas: derrumbes, flujo de detritos, aluviales, coluviales y interdigitados.

El acuífero se encuentra entre dos capas de menor permeabilidad, considerándose semipermeable la capa superior limo arcillosa y prácticamente impermeable la capa inferior de arcilla, éstas presentan condiciones de formación de relativa calma (condiciones lagunares para el fondo y techo del acuífero).

Casi en su totalidad el valle está cubierto de una capa limo arcillosa de espesor variado. Los mayores espesores se localizan en la parte central del acuífero según los registros litológicos de los pozos PP-61 con 22m y el PP-62 con 24m. En las periferias está ausente. La Figura No.IV.2, muestra la distribución del espesor de las formaciones arenosas.

La capa acuífera está formada por arena de granulometría media a gruesa, gravas y bolones, las que se interdigital con materiales finos de limo y arcilla. Los mayores espesores de material grueso se encuentran en la parte noroeste y centro oeste del valle. Otra capa de considerable espesor, 54m, está localizada al sur de San Isidro-Pozo PP-154.

El espesor de la capa inferior de arcilla no ha sido determinado en su totalidad, los registros litológicos de los tres pozos de exploración del estudio de Tahal Consulting (1977), lograron determinar en el PS-2 y PS-3, un espesor de 20 y 30m de arcilla (a 67 y 109 m de profundidad respectivamente). A una profundidad de 157.84 se alcanzó la roca consolidada.

Los puntos en el mapa representan los pozos con registros litológicos, como se observa, la distribución espacial no es uniforme, sin embargo es posible la zonificación de material de mayor permeabilidad.

La localización de los materiales permeables podrían indicar antiguos cauces; cuando se encuentran en el pié de monte de las montañas, pueden ser indicadores de derrumbes o flujos de detritos. La Fig.No.IV.3 representa un perfil alineado a la carretera San Isidro-Sébaco. En esta figura se han efectuado simplificaciones de los lentes de deposición menores de 1m, típicos de acuíferos aluviales.

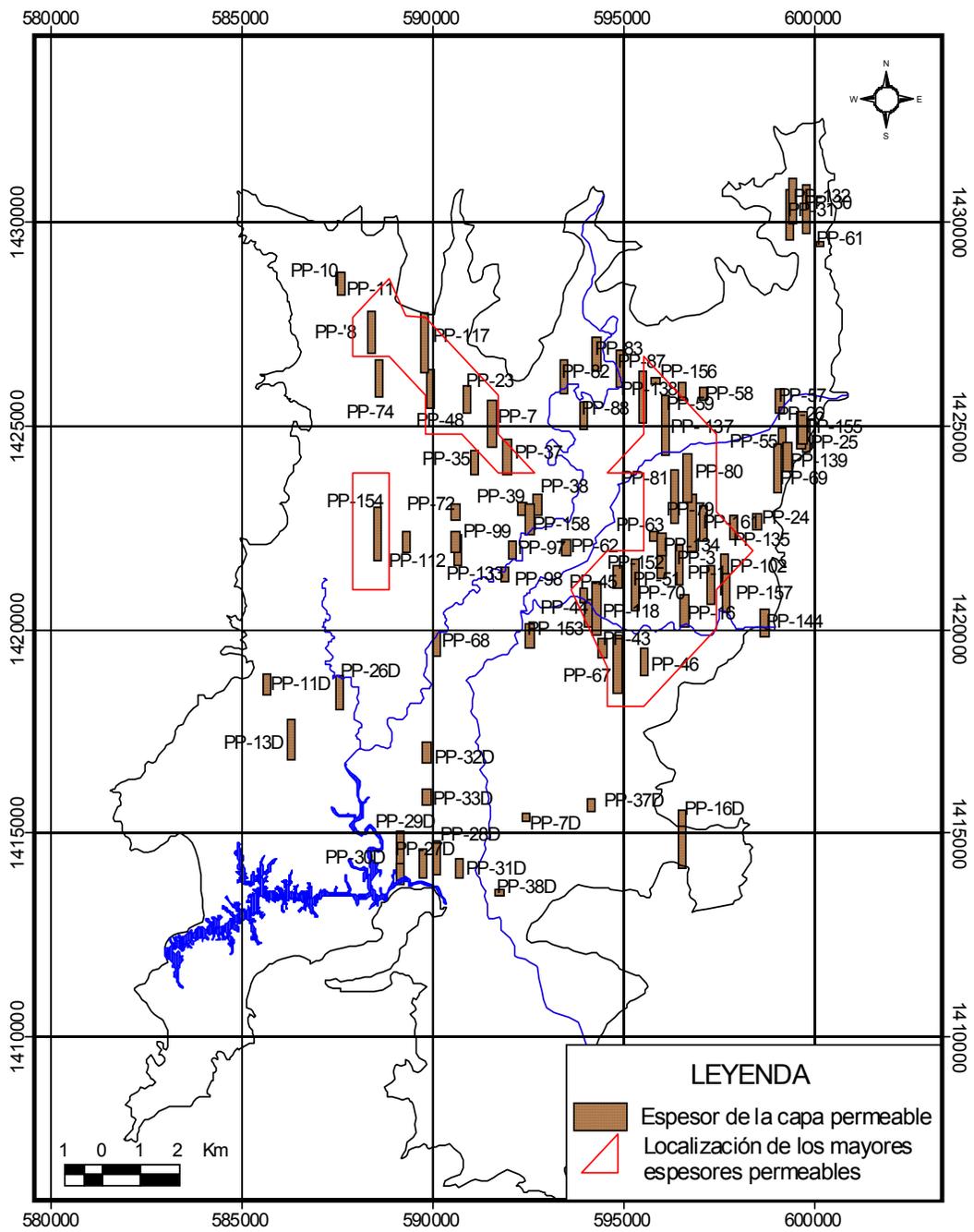


Fig. No. IV.2 Distribución de las Capas Permeables en el Acuífero

Elaborado por Flores Y. 2002

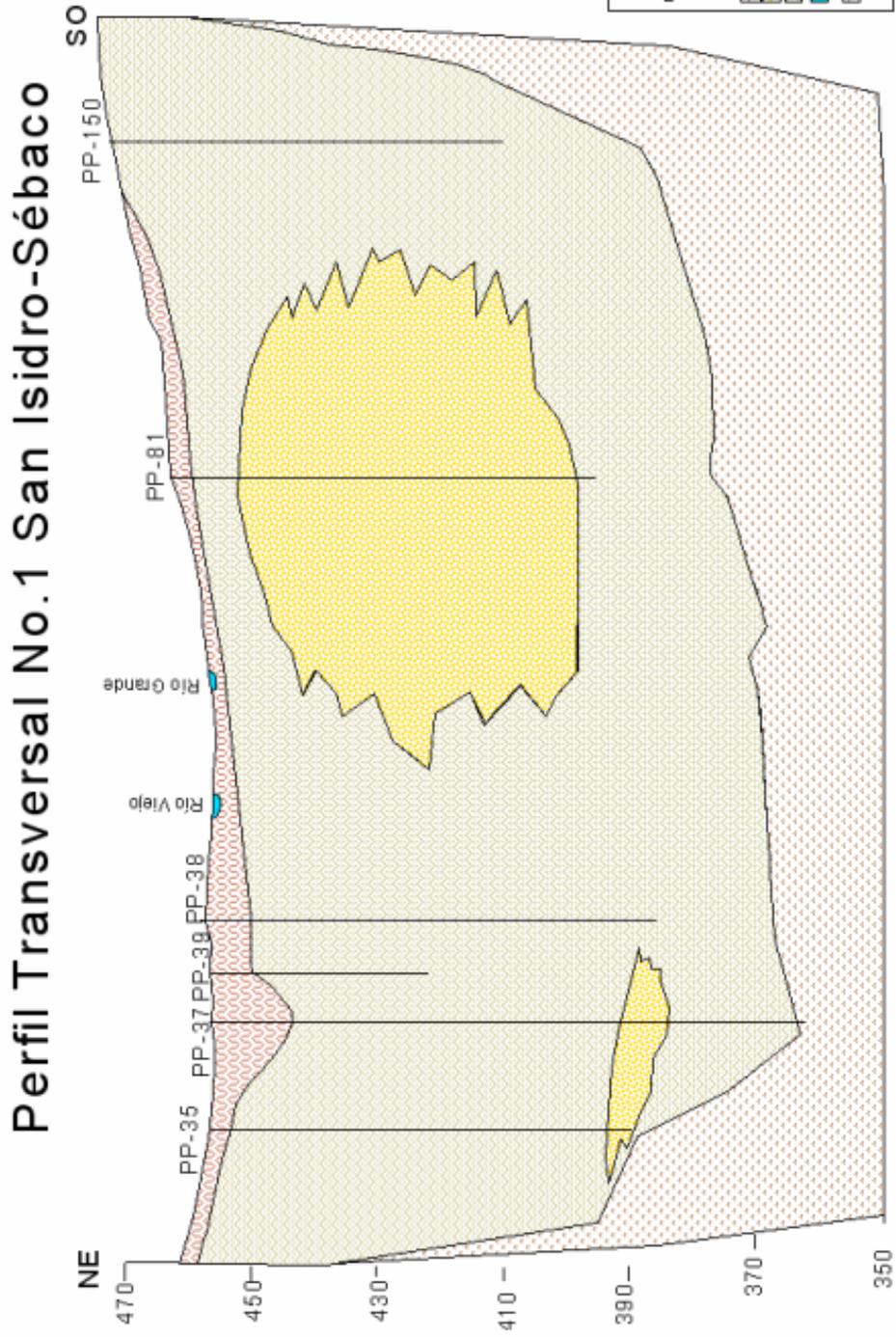


Fig.No.IV.3. Perfil Transversal del Valle de Sébaco a lo largo de la Carretera San Isidro-Sébaco

## - **Distribución de los Parámetros Hidráulicos**

### o **Transmisividad**

La determinación de los parámetros hidráulicos de los pozos, se realizó a partir de las pruebas de bombeo de 32 pozos registrados en el archivo de la Dirección de Hidrogeología de INETER y de dos pozos del Campo de Chagüitillo. Estas pruebas fueron ejecutadas por las empresas perforadoras, para el cálculo del caudal de bombeo del pozo y el tipo de bomba a colocar; en esta operación el rendimiento se determina empíricamente, asumiendo que si el caudal de bombeo no disminuye durante 3 hrs., entonces el pozo es productivo.

Estas pruebas de bombeo no se realizaron con el mismo caudal, ni tiempo de duración y en la mayoría de los casos el acuífero no llegó a estabilizarse. Pese a ello es posible obtener algunos valores orientativos que identifiquen el comportamiento del acuífero, los cuales sirven como punto de partida en la implementación del modelo matemático.

La Transmisividad es la medida de la capacidad del espesor total del acuífero de transmitir agua horizontalmente y se mide en  $m^2/día$ . Para que la transmisividad sea representativa del acuífero, la captación o el pozo debe atravesar el total saturado del acuífero, de otra manera se obtiene un porcentaje proporcional al tramo de acuífero atravesado.

La heterogeneidad del acuífero condiciona la distribución de las transmisividades, que varían de acuerdo a la composición litológica, granulométrica, grado de compactación y fracturamiento de los materiales. La Tabla IV.1 resume los valores de transmisividad a partir de las pruebas de bombeo, realizadas en el área.

Las mayores transmisividades se localizan en pozos con espesores considerables de grava y arena gruesa, así como de los pozos próximos a los ríos Viejo y Grande y los pozos localizados en las zonas de recarga del acuífero, a la entrada del Río Grande en Sébaco. Las menores, en zonas donde las capas de arcilla y limo son mayores que los materiales gruesos, en la zona de San Isidro y Ciudad Darío.

Tabla No.IV.1. Datos de Transmisividad Valle de Sébaco

Código INETER	Elevación m.s.n.m	Profundidad m	Descripción y espesor capa permeable (m)	Tiempo de Bombeo hr	T (m <sup>2</sup> /día)
PP-11D	450	64	Arena, grava, bolones 27m.	8	6.1
PP-31	495	85.4	Arena, grava, bolones 64m.	-	9.6
PP-32	457	54	Sin registro	-	9.7
PP-3D	430	51.51	Sin registro	-	24.8
PP-5D	438	54.86	Sin registro	48	24.8
PP-29	502	82.3	Sin registro	3	30.0
PP-4D	436	53.34	Sin registro	48	78.8
PP-2D	430	66.45	Sin registro	48	229.7
PP-102	470	39.63	Arena, grava, bolones 27m.	-	240.0
PP-10	482	41.8	Arena, grava, bolones 40m.	72	260.0
PP-9	467	52.4	Sin registro	-	261.0
PP-33	479	58	Sin registro	-	300.0
PP-61	501	60.98	Arena, grava, bolones 1m.	-	340.0
PP-8	467	60.9	Arena, grava, bolones 41m.	7	390.0
PP-126	474	61	Sin registro	-	400.0
PP-3	464	45.72	Arena, grava, bolones 40m.	48	870.0
PP-4	456	39.6	Sin registro	9	1000.0
PP-34	457	53.3	Sin registro	-	1010.0
PP-37	456	94.5	Sin registro	6	1041.5
PP-81	462	67.06	Arena, grava, bolones 50m.	-	1091.0
PP-16	463	46.93	Arena, grava, bolones 24m.	17	1583.0
PP-7	457	64	Arena, grava, bolones 40m.	10	1726.1
PP-6	499	53	Sin registro	-	1762.0
PP-124	468		Sin registro	4	2158.3
PP-1	469	45.72	Arena, grava, bolones 45m.	48	2608.0
PP-40	454	54.9	Sin registro	-	3610.0
PP-42	457	73.2	Sin registro	-	4688.6
PP-83	464	60.96	Arena, grava, bolones 32m	27	3277.0
PP-82	461	60.96	Arena, grava, bolones 32m		3277.0
PP-87	464	67.06	Arena, grava, bolones 16.76m	25	1865.9
PP-38	457	73.15	Arena, grava, bolones 12.49m	14.4	1204.0
PP-88	460	53.64	Arena, grava, bolones 17.37m	22	610.0

Como puede verse en la tabla anterior, solamente algunos pozos tienen pruebas de bombeo con 48 horas de duración, las que podrían dar características del acuífero, sin embargo, según los registros existentes en el archivo de la Dirección de Hidrogeología de INETER, aún en estos casos no se alcanzó la estabilización de los niveles. No se refleja, en la mayoría de los casos, el espesor de la capa acuífera y la posición de la rejilla.

Se correlaciona el espesor de las capas permeables y la transmisividad del acuífero, en la búsqueda de la interrelación de estos parámetros, debe anotarse que estos pozos no son totalmente penetrantes y la única relación que se logra visualizar es que los pozos con mayor transmisividad se encuentran distribuidos en las márgenes de los ríos o en zonas aledañas a éstos.

En la Fig.No.IV.4. se puede distinguir los puntos de realización de pruebas de bombeo.

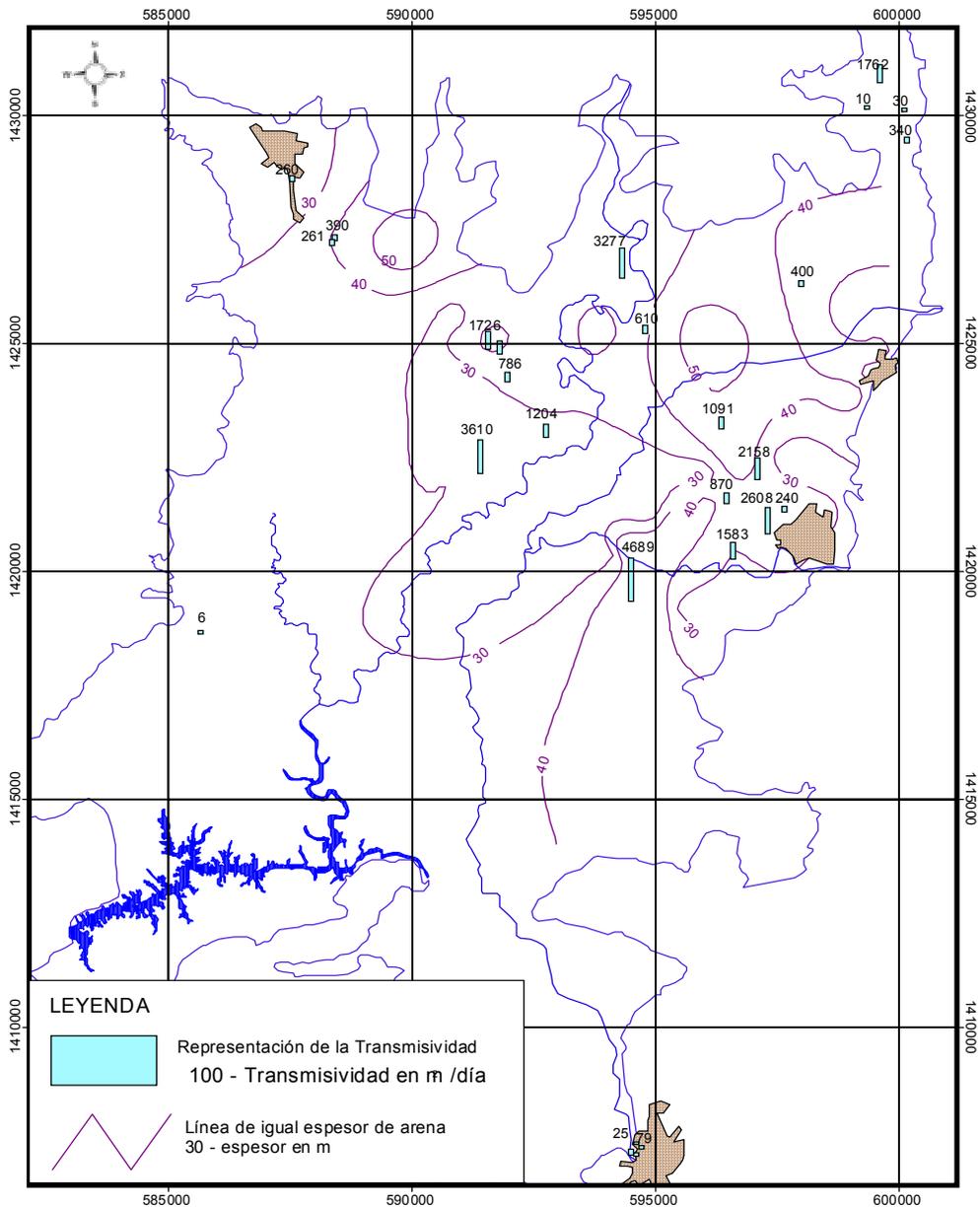


Fig. No.IV.4. Puntos de Localización de las Pruebas de Bombeo Elaborado por Flores Y. 2003

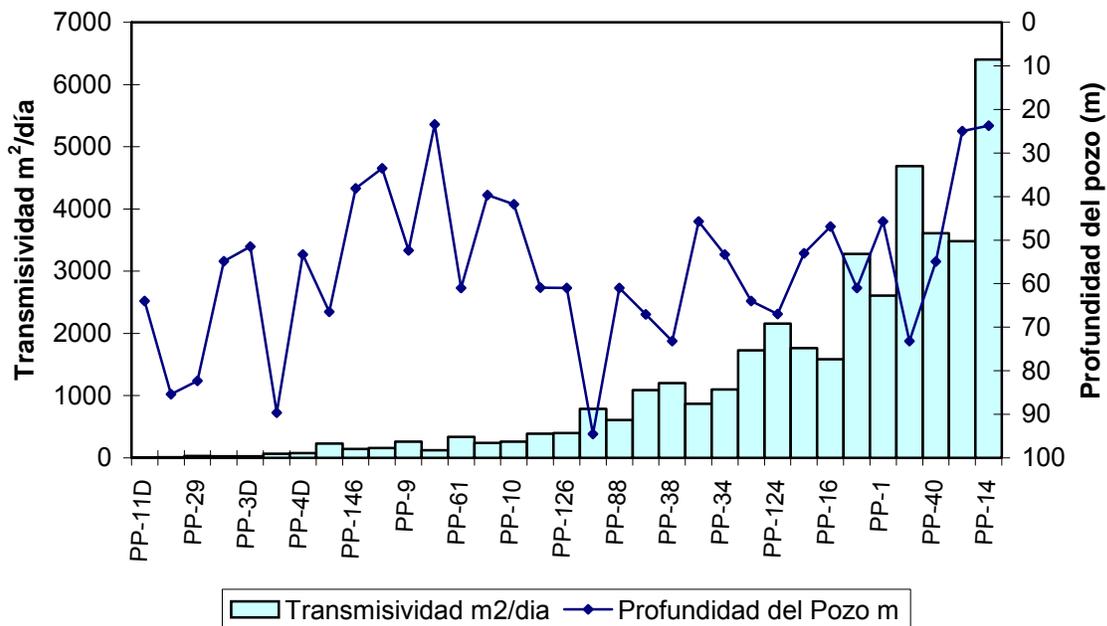


Gráfico No. IV.1. Correlación entre la profundidad de los pozos y la transmisividad.

Del Gráfico No.IV.1 se demuestra que no se distingue una clara tendencia en el comportamiento de la transmisividad para los pozos del valle, ya que estos tienen un rango amplio de acuerdo a su profundidad, que en la mayoría de los casos oscila entre los 40 y 100m. Se debe esperar el aumento de la transmisividad al aumentar la profundidad, dependiendo de la capa que se atravesase, ya sea arenas medias, gruesas, o capas de limo y arcilla. Sin embargo se observa una transmisividad promedio aproximada de  $1000\text{m}^2/\text{día}$ .

#### ○ Conductividad Hidráulica

La conductivade hidráulica, es uno de los parámetros más importantes para la calibración del modelo, ya que representa la velocidad real a la cual se mueve el agua en el medio poroso, tomando en cuenta el tamaño de los poros, la distribución de éstos y los flujos preferenciales. Se distinguen tres componentes de conductividad: horizontal ( $K_h$  o  $K_x$ ), lateral ( $K_l$  o  $K_y$ ) y vertical ( $K_v$  o  $K_z$ ).

Esta característica, se da también de forma promedio, por no estar claro la posición de la rejilla en los pozos, o el espesor saturado del acuífero.

La fórmula utilizada para el cálculo de las conductividades hidráulicas es:

$$T = K * b \longrightarrow K = T/b$$

Donde :

T – es la transmisividad en m<sup>2</sup>/d

K – es la conductividad hidráulica en m/d

b – el espesor saturado del acuífero o lámina de agua atravesada en m

En este caso para el valor de b se utilizan el espesor captado del acuífero o sea la diferencia entre la profundidad del pozo y el nivel estático del acuífero. Por ejemplo para el pozo PP-42, con una profundidad de 73.2m y un nivel bajo el terreno de 16.5, el espesor captado del acuífero es de 56.7m. Entendiéndose que este valor es aproximadamente el valor real de la conductividad total del acuífero.

Los conductividad hidráulica obtenida es la horizontal. La conductividad vertical se tomará como 1/10 de la horizontal. La Tabla IV.2. muestra los valores de los parámetros hidráulicos del acuífero.

Tabla No. IV.2 Datos de Conductividad Hidráulica del Valle de Sébaco

Código de Pozo	Espesor de la lámina de agua m	T (m <sup>2</sup> /día)	K (m/día)	K (m/sec)
PP-10	32.70	260.00	7.95	9.20E-05
PP-8	55.41	390.00	7.04	8.15E-05
PP-61	50.55	340.00	6.73	7.78E-05
PP-9	40.99	261.00	6.37	7.37E-05
PP-33	51.90	300.00	5.78	6.69E-05
PP-2D	62.80	229.73	3.66	4.23E-05
PP-4D	45.24	78.80	1.74	2.02E-05
PP-29	52.12	30.00	0.58	6.66E-06
PP-3D	45.11	24.84	0.55	6.37E-06
PP-5D	45.72	24.84	0.54	6.29E-06
PP-32	42.02	9.70	0.23	2.67E-06
PP-31	54.92	9.60	0.17	2.02E-06
PP-11D	51.50	6.13	0.12	1.38E-06
PP- Pozo Perforado, T-Transmisividad Hidráulica, K- Conductividad hidráulica				

Continuación Tabla. IV.2 Datos de conductividades hidráulicas a partir de pruebas de bombeo.

Código de Pozo	Espesor de la lámina de agua m	T (m <sup>2</sup> /día)	K (m/día)	K (m/sec)
PP-6	11.10	1762.00	158.74	1.84E-03
PP-1	23.32	2608.00	111.84	1.29E-03
PP-124	21.82	2158.25	98.91	1.14E-03
PP-40	42.93	3610.00	84.09	9.73E-04
PP-42	56.70	4688.60	82.69	9.57E-04
PP-83	60.97	3277.00	53.75	6.22E-04
PP-82	67.06	3277.00	48.87	5.66E-04
PP-16	33.28	1583.00	47.57	5.51E-04
PP-4	24.87	1000.00	40.21	4.65E-04
PP-87	50.76	1865.90	36.76	4.25E-04
PP-7	52.42	1726.10	32.93	3.81E-04
PP-34	34.99	1010.00	28.87	3.34E-04
PP-3	31.37	870.00	27.73	3.21E-04
PP-81	54.81	1091.00	19.91	2.30E-04
PP-38	61.16	1204.00	13.30	2.28E-04
PP-37	78.28	1041.50	13.30	1.54E-04
PP-102	18.29	240.00	13.12	1.52E-04
PP-88	47.13	610.00	12.94	1.50E-04
PP-126	43.01	400.00	9.30	1.08E-04

PP- Pozo Perforado, T-Transmisividad Hidráulica, K- Conductividad hidráulica

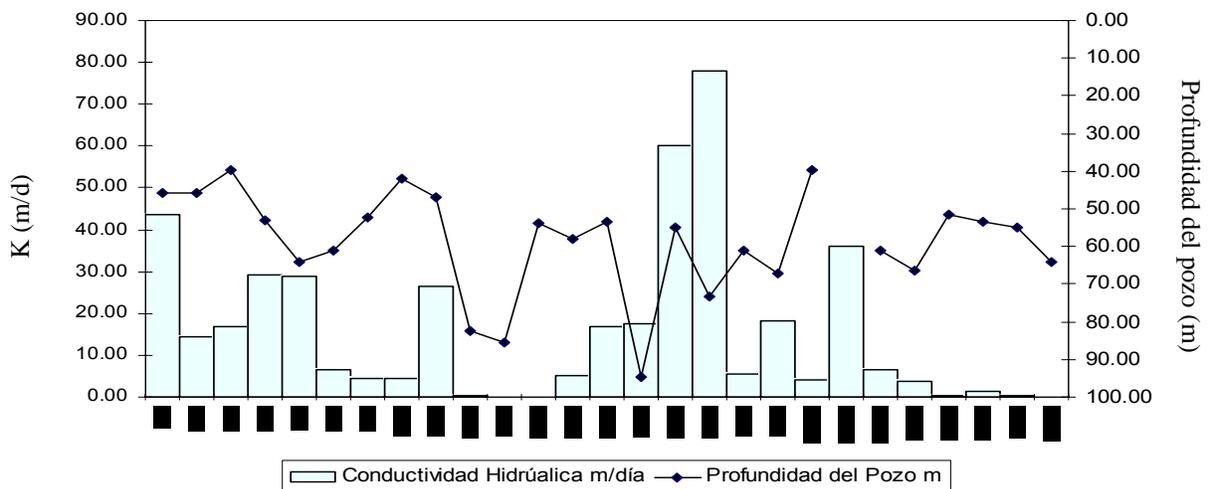


Gráfico No.IV.2. Correlación de la profundidad de los pozos y las s conductividades hidráulicas

No se observa una clara interrelación entre la profundidad de los pozos y la conductividad hidráulica, debido a la heterogeneidad del acuífero.

Los valores de conductividad hidráulica oscilan entre los 5 y 30 m/día en general. Se observan valores mayores de 50 m/día hasta más de 100m/día correspondiendo una vez más a los pozos de las riberas de los ríos, por lo que se consideran no representativas para el acuífero. Los datos existentes son pocos comparados con el tamaño del acuífero. Las zonas con carencia de datos se comparan con los valores obtenido en las zonas con características similares.

Las conductividades hidráulicas se toman como valores medios de las unidades hidroestratigráficas del acuífero, quedando distribuidas a como se refleja en la Fig. No.IV.5.

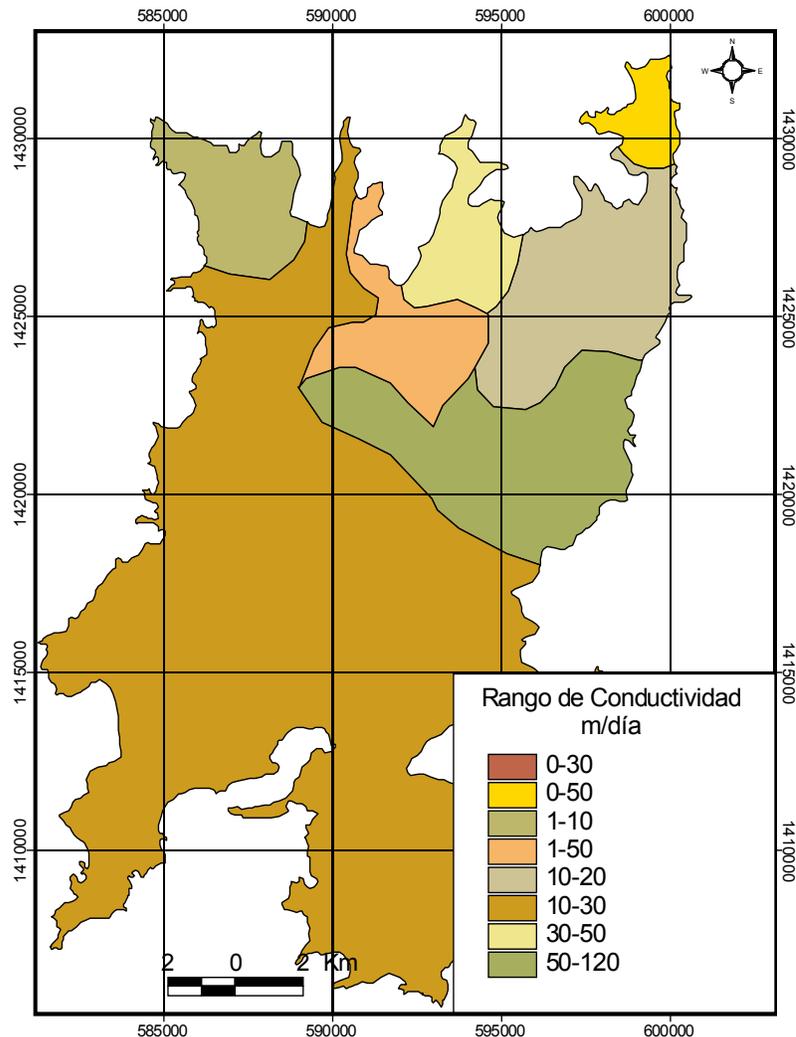


Fig. No.IV.5. Distribución de las Conductividades Hidráulicas (m/día) en el Valle de Sébaco.

Elaborado por Flores Y. 2002

#### 4.2.3 Determinación de las Unidades Hidroestratigráficas

A partir de la caracterización litoestratigráfica y la determinación de los parámetros hidráulicos, se realizan las siguientes consideraciones:

- El techo del acuífero es una capa limo - arcillosa, que presenta un máximo espesor de 25m en el centro del valle, en la periferia se acuña hasta desaparecer.
- El conjunto acuífero es una intercalación de capas de diferente granulometría con espesores de arena gruesa que alcanzan los 60m, se distingue una zonificación horizontal de espesores permeables no así en profundidad, por lo tanto, se toma como una solo unidad. El medio hidrogeológico es heterogéneo, con intercalaciones de capas de material fino (baja permeabilidad) y fracciones gruesas (alta permeabilidad).
- Las pruebas de bombeo se realizaron en pozos, donde la rejilla generalmente se coloca en todos los estratos permeables, por lo que la diferenciación de las unidades estratigráficas a partir de éstas no ha sido posible, por lo tanto se ha conjugado con la litología.

En consecuencia, se distinguen tres unidades estratigráficas, Fig.No.IV.6, una capa limo-arcillosa de baja permeabilidad que varía desde 0 a 24m, sobreyaciendo sobre la unidad acuífera de 30 hasta 70m de espesor y bajo ésta, otra capa de arcilla de menor permeabilidad, de espesor desconocido, la que a su vez se encuentra sobre las rocas de la formación volcánica consolidada.

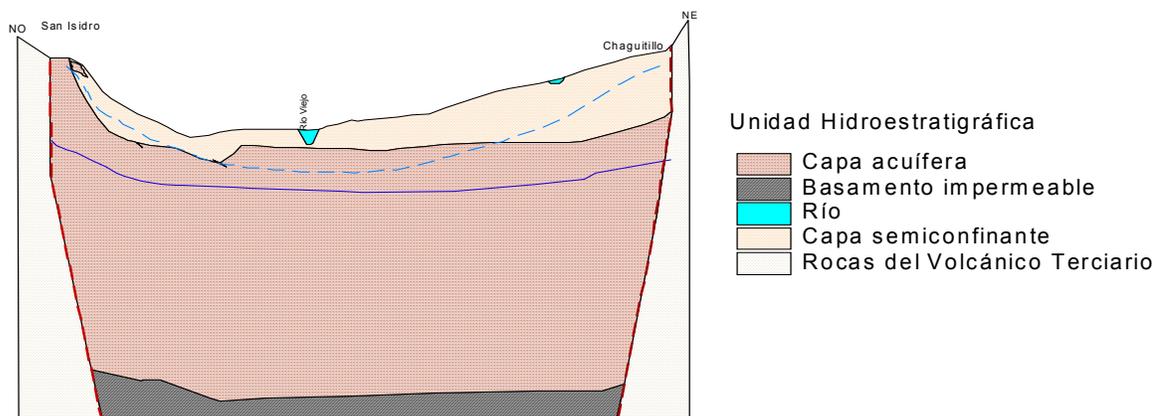


Fig. No.IV.6. Unidades Hidroestratigráficas Acuífero Valle de Sébaco. Elaborado por Flores Y. 2002

#### **4.2.4 Basamento del Acuífero**

Los pozos con registros litológicos no son totalmente penetrantes, solamente en el PS-1, localizado en el puente sobre el río Viejo, penetra hasta el basamento rocoso a una profundidad de 157m.

Se considera este valor, la primera aproximación de profundidad para el área central del acuífero; en los bordes de los valles, el basamento es menos profundo, aquí los pozos alcanzan el basamento en los primeros 30m. Se ha realizado la extrapolación desde los pozos de la periferia, hasta alcanzar un fondo plano en el centro del valle, que se asume es el bloque hundido del graben.

Para determinar la elevación del basamento impermeable con un poco más de precisión, se realizó un estudio geofísico con la técnica electromagnética. Sin embargo el método electromagnético es muy sensible a las interferencias, lo que acarrea incertidumbre en los resultados. Otra limitante de este método es la penetración, que se asume sea de 150m aproximadamente; esto fue corroborado con el pozo de exploración más profundo.

Sin embargo, con la correlación de los registros litológicos de los pozos más profundos, las respuestas del medio a la corriente y la eliminación de ruido correlacionando con los pozos más profundos, se logró una buena estimación de la profundidad del basamento. Fig. No.IV.7.

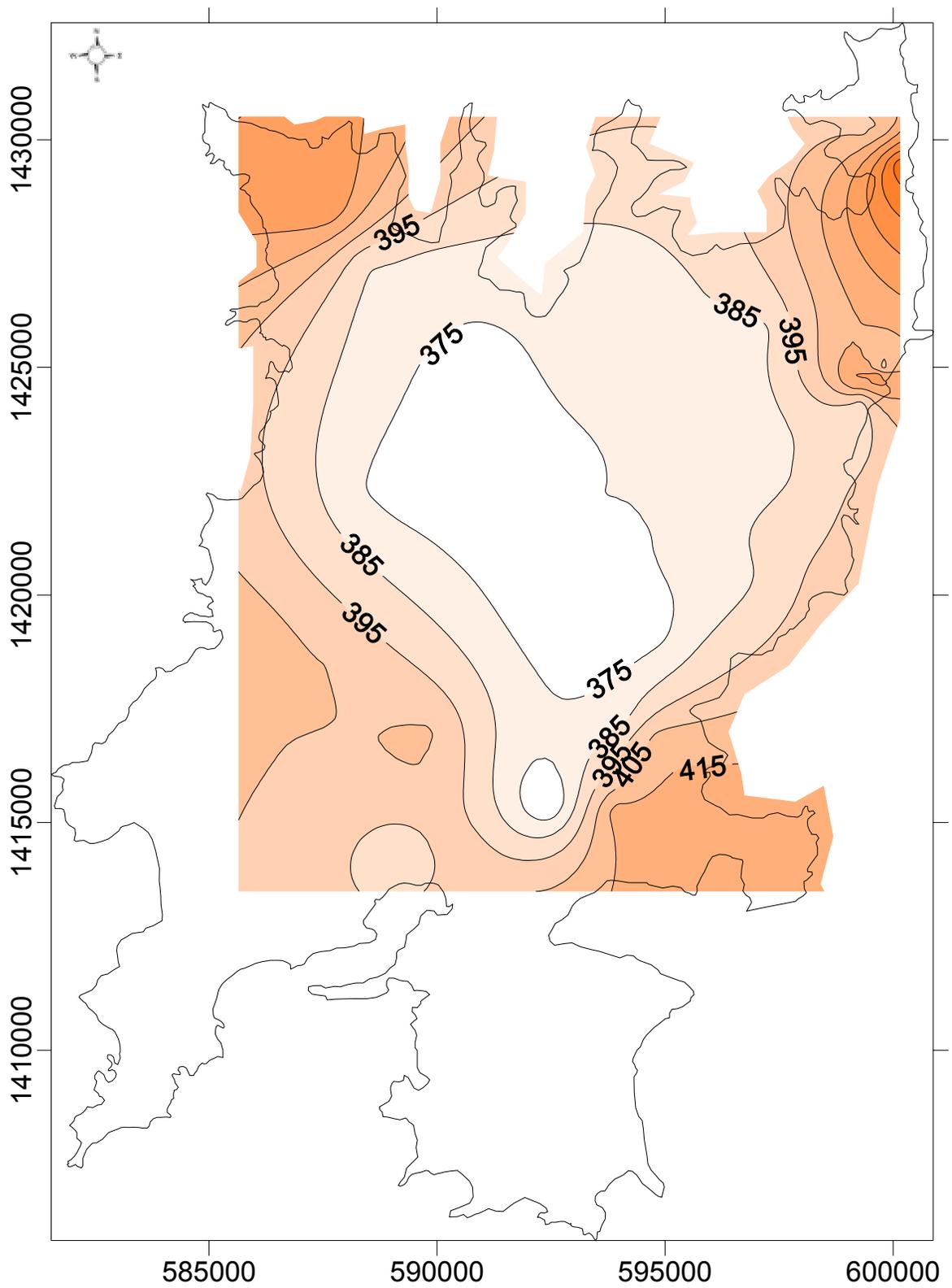


Fig. No. IV.7. Mapa del elevación del Basamento Impermeable Elaborado por Flores Y. 2002

#### 4.2.5 Superficie Piezométrica

La determinación de los niveles freáticos en el acuífero, ha sido una tarea compleja, debido al desconocimiento del diseño y profundidad de la mayoría de los pozos y al intenso bombeo a que está sometido.

Los pozos de observación son los mismos de producción, ya que no existen en el área obras exclusivas para investigaciones, por lo que las mediciones podrían no reflejar el nivel recuperado del acuífero o nivel estático.

Los pozos tienen diferentes profundidades aún ubicados en la misma zona, presentando el nivel piezométrico en diversos estratos del acuífero, esto dificulta la construcción del mapa piezométrico, sobre todo para las áreas de la zona de recarga y descarga del acuífero; donde las superficies piezométricas suelen ser cóncavas en la primera y convexas en la segunda. Fig. No.IV.8.

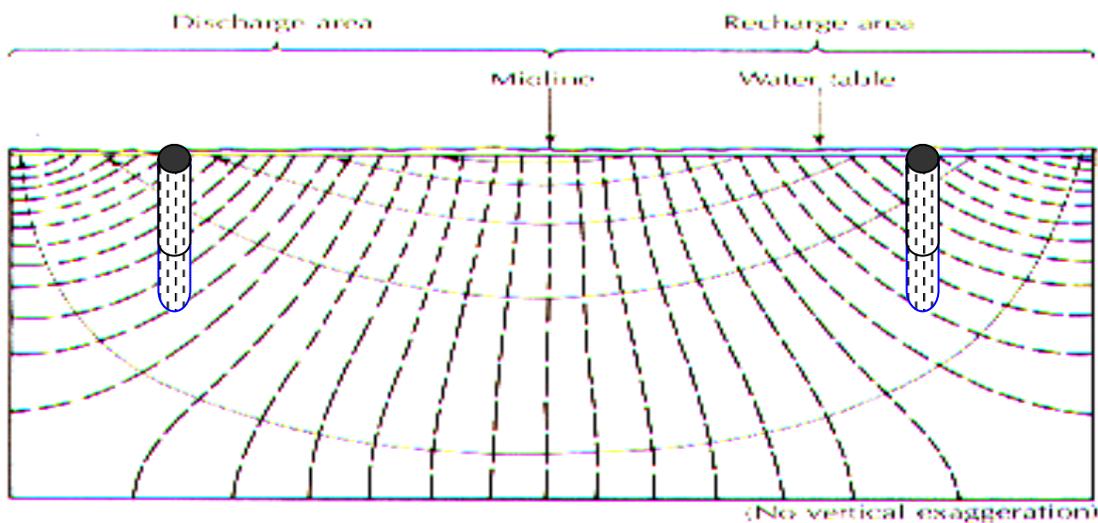


Fig. No.IV.8 Patrón de Flujo Regional. Tóth J.A.1962

En la Fig. No.IV.8 se puede notar las superficies piezométricas en perfil, puede verse que si un pozo es perforado en la zona de recarga o descarga a diferentes profundidades, éste reflejaría diferentes niveles piezométricos en el mismo punto.

En la mayoría de los pozos se desconoce la posición de la rejilla, entonces se toma el nivel freático calculado, como promedio, suponiendo que la rejilla está colocada en todas las capas permeables, según práctica de las empresas perforadoras.

Fig.No.IV.9

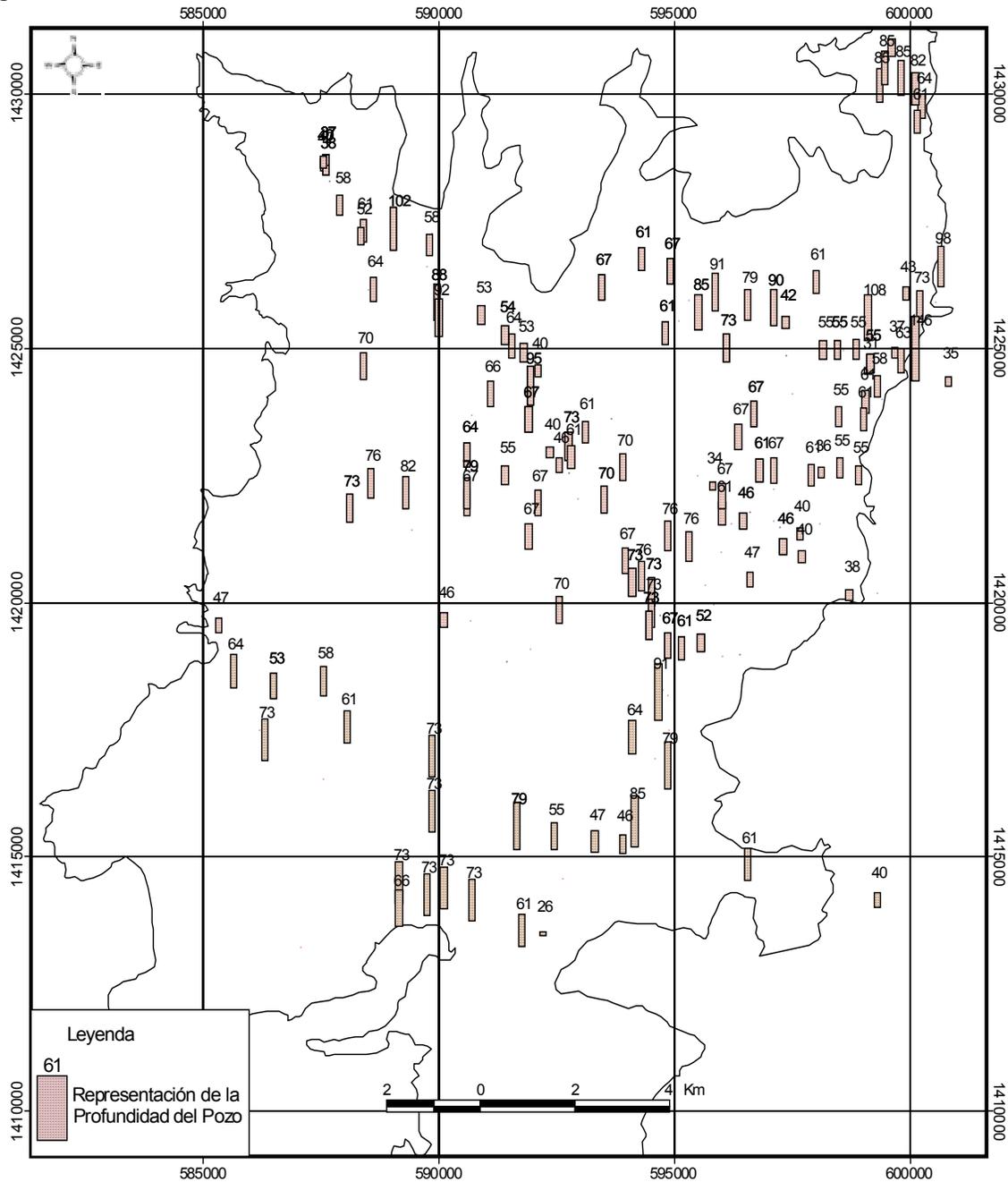


Fig. No.IV.9. Representación de la Profundidad de los Pozos en el Valle

La Fig. No.IV.10. presenta la Superficie Piezométrica, realizada a partir de los datos recopilados en el presente estudio, en el mes de Abril 2002 (Anexo A). Los niveles freáticos actuales oscilan entre los 445 al norte y los 425m.s.n.m en la zona de Ciudad Darío. Los gradientes hidráulicos son pequeños, al norte tienen una pendiente más pronunciada de 0.006 y al sur es más horizontal de 0.0008, con una variación de un orden de magnitud. Además, se observa que la superficie piezométrica, es una clara representación de los abatimientos por bombeo; sin embargo reproducen el patrón de flujo de la época de 1970, considerado en condiciones naturales.

La zonas de recarga se reproducen nuevamente al norte y bordes del valle. Se presentan dos zonas de descarga, localizadas al suroeste por el Embalse La Virgen, como descarga superficial y al sureste en Ciudad Darío con una salida subterránea, reflejada por los niveles freáticos más bajos que el nivel del río Grande de Matagalpa.

El tipo de aguas bicarbonatadas cálcicas, predominante en todo el acuífero, indican que el movimiento del agua es relativamente rápido y no da lugar a una evolución hidrogeoquímica completa. A esto se suma la corta distancia (15km) de recorrido entre la zona de recarga y descarga del acuífero.

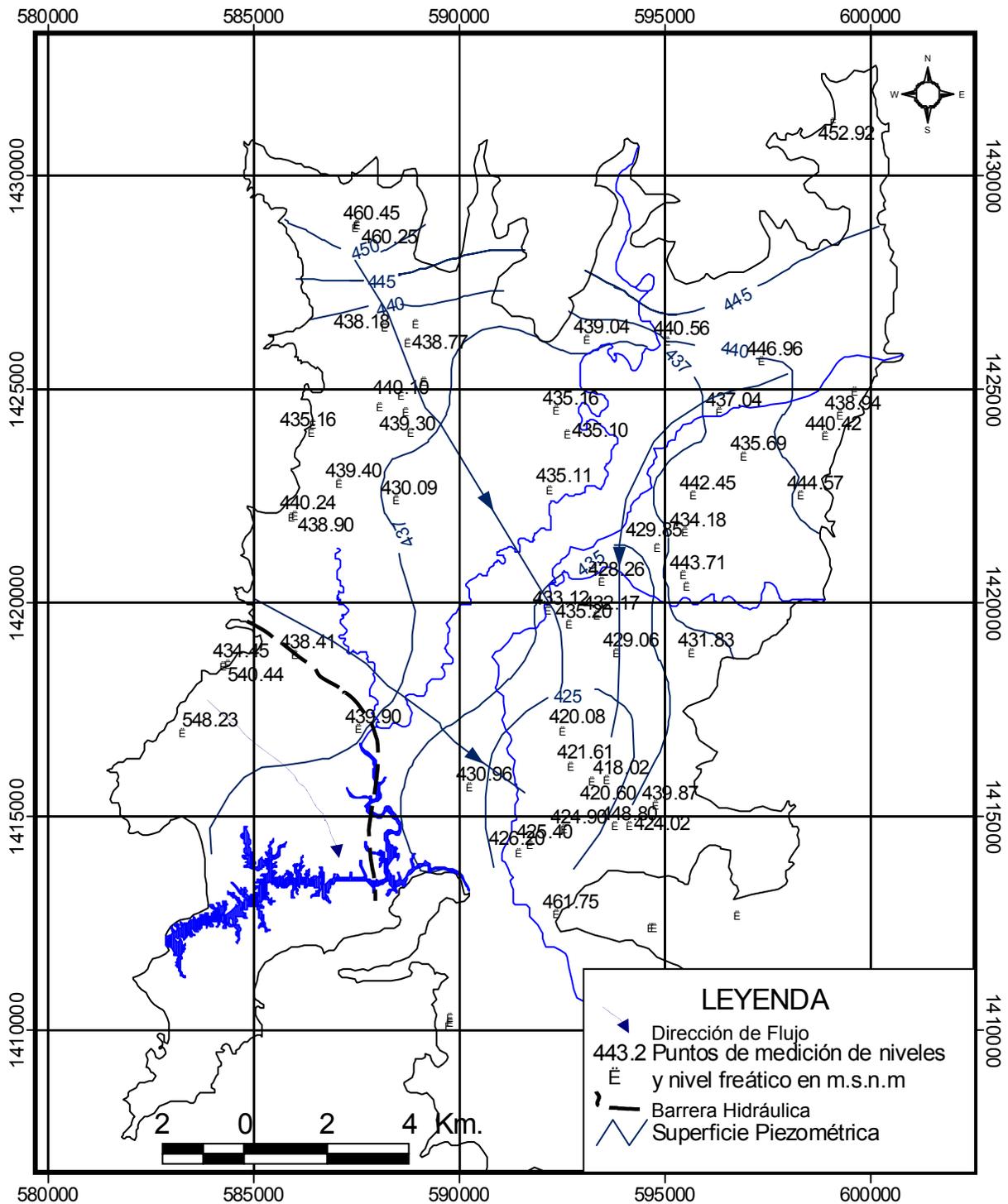


Fig. No.IV.10. Superficie Piezométrica. Abril 2002

Elaborado por Flores Y. 2002

### IV.3 Estimación de la Recarga Natural

El parámetro de Evapotranspiración Potencial (ETP), es el valor conjunto de la evaporación y la transpiración a través de las plantas en la zona. Se debe calcular este valor para determinar la recarga al acuífero.

La Evapotranspiración Potencial, es la cantidad máxima de agua que podría evaporarse de una superficie, si existiese abastecimiento ilimitado de ésta. Para obtener los valores de ETP, se utilizó el método de Thornwhaite, el cual calcula estos datos a partir de la Temperatura predominante en la zona, mediante la siguiente fórmula:

$$ET_p = 1.6 \left( \frac{I_1}{12} \right) \left( \frac{N}{30} \right) \left( \frac{10T_a}{I} \right)^{a_1}$$

donde  $I_1$  es el número de horas reales de sol al día,  $N$  es el número de días al mes,  $T_a$  es la temperatura media mensual en °C, y  $a_1$  se define como:

$$a_1 = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49$$

$I$  es el índice de calor derivado de la suma de los 12 valores de los índices mensuales ( $i$ ), obtenida a partir de:

$$i = \left( \frac{T_a}{5} \right)^{1.514}$$

La Evapotranspiración Potencial en el valle es muy alta, más de 1000mm anuales, sobrepasando los valores de precipitación.

Las Tablas Nos.IV.3, IV.4, muestran los resultados del cálculo promedio de precipitaciones y ETP en mm, en el valle.

Los resultados de ETP, obtenidos a partir de estas ecuaciones pueden considerarse sobreestimados, ya que no considera el efecto de la vegetación.

**Tabla No.IV.3 Promedios mensuales de Precipitación (mm) de las estaciones ubicadas en el Valle de Sébaco**

PERIODO	ESTACION	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1952-1989	SEBACO	4.70	2.20	6.40	24.60	140.90	178.80	68.90	84.40	172.30	155.10	35.50	5.40	879.20
1958-1987	Sn ISIDRO	2.70	1.30	10.20	16.20	111.30	120.60	79.30	117.80	176.30	173.10	45.70	6.20	860.70
1966-2001	Sta. BARBARA	1.20	0.50	6.20	29.40	199.00	161.90	66.10	117.80	203.60	158.00	59.30	6.50	1009.50
1966-2001	DARIO 1966 - 2001	3.40	0.50	8.20	21.00	123.20	137.70	64.70	96.30	182.70	164.80	42.40	5.70	850.60
PROMEDIO		3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00

**Tabla No.IV.4. Promedios mensuales de ETP (mm) de las estaciones ubicadas en el Valle de Sébaco.**

PERIODO	ESTACION	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1952-1970	SEBACO	106.67	100.92	98.68	96.47	100.92	94.29	85.87	79.88	67.81	73.23	86.90	88.97	1080.60
1958-1987	Sn ISIDRO	107.74	94.86	99.07	98.02	87.92	88.86	85.05	86.91	84.97	79.20	96.97	105.34	1114.90
1966-1989	Sta. BARBARA	126.45	107.52	107.74	107.74	97.93	101.19	96.90	96.97	93.88	92.22	118.03	127.19	1273.76
1966-2001	DARIO	126.45	107.52	107.74	107.74	97.93	101.19	96.90	96.97	93.88	92.22	118.03	127.19	1273.76
PROMEDIO		116.83	102.70	103.31	102.49	96.18	96.38	91.18	90.18	85.14	84.21	104.98	112.17	1185.75

#### 4.3.1 Cálculo de la Recarga por el Balance Hídrico de Suelos. Lirios – Losilla

El estudio de Tahal Consulting (1977), realizó 5 pruebas de infiltración en los diferentes tipos de suelo del valle, las que fueron utilizadas en la recarga potencial al acuífero. Anexo A.

El cálculo de la recarga por medio del balance hídrico de suelos, se basa en la capacidad de campo de los suelos, la precipitación, el tipo de cultivo en el área entre otros parámetros. La Tabla No.IV.5. muestra los valores de recarga obtenidos para cada tipo de suelo, la Tabla No. IV.6, la recarga total calculada para todo el acuífero.

Tabla No. IV.5. Recarga según datos de pruebas de infiltración.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Recarga (mm de Precipitación)</b>
Vertisol	0
Chagüitillo (Arena gruesa)	229.13
Aluvial (Arena media)	180.38
San Isidro (Arena gruesa y bolones)	208.50

Tabla No. IV.6. Recarga Total en todo el Valle

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Recarga Total por Precipitación directa (MMC)</b>
Vertisol	126.26	0
Chagüitillo (Arena gruesa)	33.42	7.66
Aluvial (Arena media)	32.86	5.93
San Isidro (Arena gruesa y bolones)	23.22	4.84
<b>Recarga Directa Total</b>		<b>18.43</b>

### 4.3.2 Por el Contenido de Tritio ( $^3\text{H}$ ) Termonuclear. Plata, A.1998

La recarga natural del acuífero se refiere al volumen de agua expresada en mm como lámina que llega hasta el acuífero, formando a partir de ese momento parte de la zona saturada, durante un período de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua superficial.

El estudio de Plata A. (1988), realizó una estimación de la recarga a partir de los resultados de tritio ( $^3\text{H}$ ). Los valores modificados a partir del tritio extraído se presentan en la Tabla No.IV.7. La Fig.No.IV.11 presenta celdas con concentraciones de tritio similares. Los colores indican agrupación en zonas de recarga.

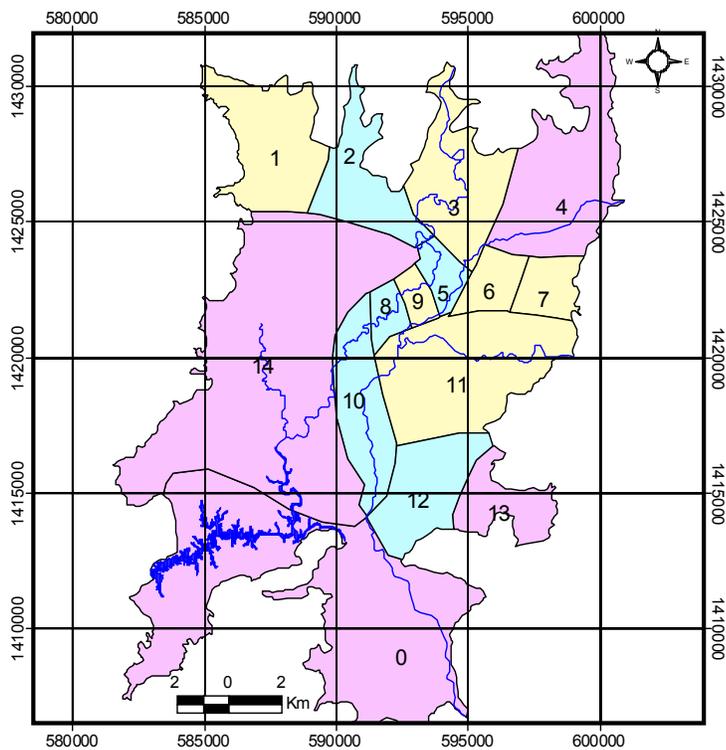


Tabla IV.7. Distribución de la Recarga por contenido de  $^3\text{H}$

No. Celda	Área en (Km <sup>2</sup> )	Recarga por celda (MMC/añual)	Lámina de Recarga (mm/añual)
1	15.95	1.404	88.0
2	10.75	0.146	13.6
3	15.46	1.399	90.5
4	24.12	0.219	9.1
5	3.38	0.114	33.7
6	4.49	0.691	153.9
7	4.87	0.301	61.8
8	2.73	0.069	25.3
9	2.18	0.192	88.1
10	11.57	0.186	16.1
11	25.51	2.554	100.1
12	11.87	0.161	13.6
13	7.1	0.068	9.6
14	64.68	0.194	3.0
<b>Recarga Total</b>		<b>7.699</b>	

Fig. No. IV.11 Distribución de la recarga por el método de Tritio ( $^3\text{H}$ ) Termonuclear

Tomado de Plata A. (1988) y reformado para el presente estudio.

La mayor recarga anual se realiza a través de las celdas 1,3, 6, 7, 9 y 11, con valores cercanos o mayores a 100mm anuales, seguida de las 5, 8, 10 y 13, con una recarga entre 10 y 50 mm anuales; en las números 4, 13 y 14 la recarga anual es menor de 10mm anuales. Estos valores a excepción de la celda 4 coinciden con los datos calculados a partir del Balance Hídrico de Suelos

### 4.3.3 Por la Fórmula Analítica Schosinsky - Losilla

La recarga natural está condicionada por el tipo de suelo, la vegetación, tipo de cultivo, la topografía y las condiciones climatológicas (Temperatura, Precipitación, Humedad Relativa, Evapotranspiración). Para el cálculo de la recarga directa por precipitación, se utilizó la ecuación general de infiltración desarrollada para los acuíferos de Costa Rica por Schosinsky G. y Losilla M.

$$I = 0.88 * C * P$$

I - Infiltración mensual (mm/mes), P – Precipitación mensual (mm), C – Coeficiente de infiltración (adimensional).

C= (Kp + Kv +Kfc), donde Kp , Kv – fracción que infiltra por efecto de la pendiente y se toman del “Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos” (ONU, 1972).

Kfc - Fracción que infiltra por efecto de textura del suelo, según la fórmula

$$Kfc = 0.267\ln(fc)-0.000154fc-0.723 \text{ (Schosinsky, G., 1999)}$$

Esta ecuación fue obtenida a partir de datos estadísticos en los que se determinó un coeficiente de infiltración, tomando en cuenta los parámetros antes señalados.

La Tabla IV.8 muestra el resumen de los resultados obtenidos mediante la ecuación mencionada. Para una precipitación promedio de 900mm anuales, el porcentaje de precipitación que infiltra es como sigue:

Tabla No.IV.8. Valores de recarga por tipo de suelo. Método analítico Schosinsky G.& Losilla M (1999).

Tipo de Suelo	Area Cubierta m	Recarga Potencial m	Recarga Total MMC
Vertisol	75756000	0.6	45.4536
Chaguitillo	26736000	0.8	21.3888
San Isidro	26288000	0.8	21.0304
<b>Total</b>			<b>87.8728</b>

Los valores de recarga potencial por este método para suelos vertisoles son bastante altos, sin embargo ya que sobre éste se cultiva arroz por inundación, se aumenta la posibilidad de infiltración hacia los horizontes subterráneos, a través de

las grietas del suelo y los canales de riego. En el Anexo A, se presentan los cálculos realizados por este método.

La Fig. No.IV.12 muestra la distribución espacial de la infiltración calculada por este método.

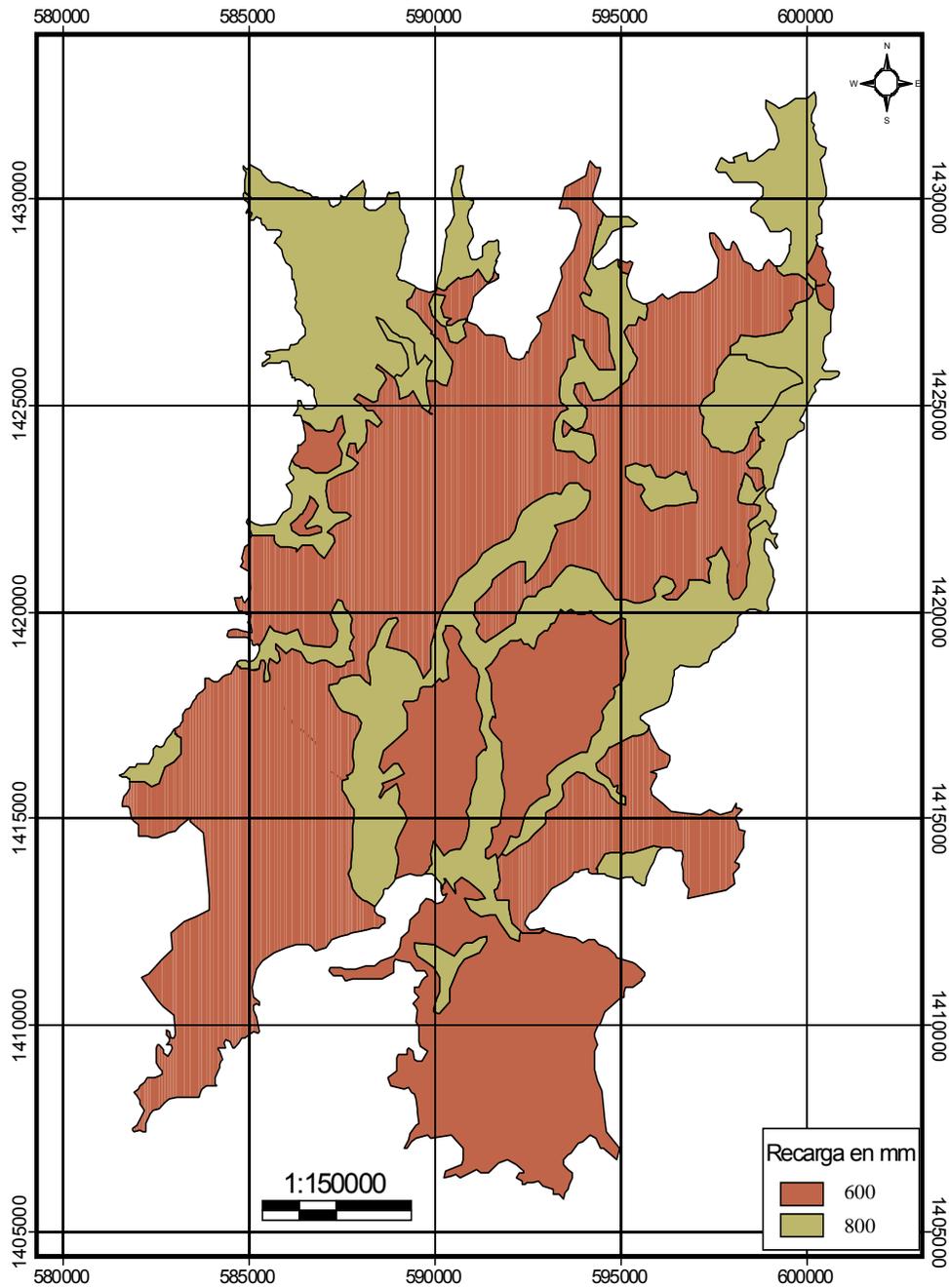


Fig. IV.12. Distribución de la Recarga Natural. Método analítico Schosinsky G.-Losilla M (1999)

Elaborado por Flores Y, 2003

#### 4.3.4 Infiltración a través del cauce de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa

##### – Red de Drenaje

La red de drenaje de la cuenca de captación del acuífero del valle de Sébaco está condicionada por la litología de las formaciones geológicas, y tectónica del valle. Las montañas y las fallas determinan la distribución de las corrientes superficiales de agua, donde predomina el patrón de drenaje tipo sub-paralelo en algunas áreas y dendrítico en otras. Fig.No. IV.13.

De las montañas colindantes durante la época lluviosa, nacen una serie de manantiales, los cuales infiltran directamente en los bordes del valle o descargan a los ríos mencionados. Estos manantiales representan recarga al acuífero de fallas en rocas fracturadas y fuertemente intemperizadas; que dan lugar a una infiltración cuando las lluvias son prolongadas y donde las pendientes son más suaves. La mayoría de estos manantiales se secan en el verano.

La Foto No.2 muestra uno de los manantiales perennes del valle, localizado en las montañas del noroeste del valle, esto comprueba la permeabilidad secundaria de las rocas consolidadas, las que finalmente se infiltran en el acuífero como recarga lateral.



Foto No.2 Manantial en los bordes del Valle.

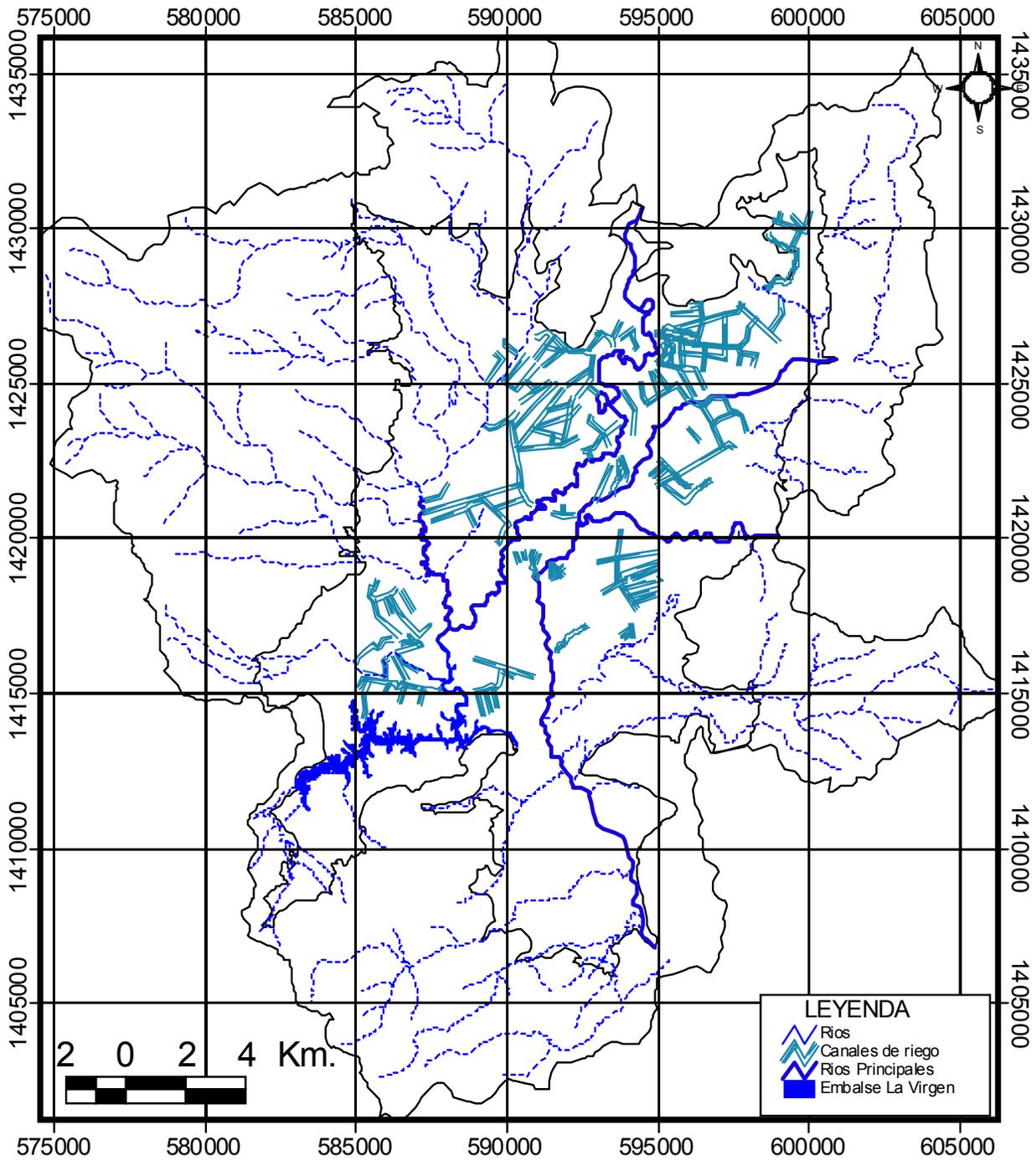


Fig. No.IV.13. Distribución de la red de Drenaje del Valle.

Elaborado por Flores Y. a partir de mapa topográfico 1:50000. INETER

#### IV.4 Relación Agua Superficial – Agua Subterránea

Los ríos principales circulan sobre la capa semipermeable, manteniendo una relación con el acuífero como aportadores o influentes, esto se comprueba con los niveles freáticos de los pozos cercanos a los ríos, en la zona correspondiente a la entrada de los ríos al valle y cerca de la salida, éstos presentan una diferencia de pocos metros entre la carga del río y el nivel piezométrico del agua subterránea.

El Estudio Isotópico del Valle de Sébaco (Plata A.,1988), presenta claramente por la concentración de tritio termonuclear y por el contenido de sílice, el carácter influente de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa.

Existen dos estaciones a la entrada y salida de estos ríos en el valle, sin embargo debido a que los agricultores toman agua de estos ríos, las cifras no reflejan la dinámica del curso de agua en sí (pérdida o ganancia), no obstante, el agua de los ríos tomada para riego de cultivos, contribuye como recarga en otras áreas del valle.

La recarga a través del lecho del Río Viejo y del Río Grande de Matagalpa, se tomó de acuerdo al material que compone el lecho del río, correlacionando éstos con las pruebas de infiltración en el valle. El valor de la recarga en el lecho de los ríos se toma de 180.38mm, como punto de partida, debido al material del cauce que es predominantemente aluvial, arena gruesa. La Tabla No.IV.9, muestra la recarga a través del lecho del río.

Tabla No.IV.9. Infiltración a través del cauce de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa

Río/Parámetro	Largo (m)	Ancho (m)	Recarga x Balance Hídrico (m)	Recarga Total MMC
Río Viejo	25000	15	0.3	0.11
Río Grande	20000	15	0.3	0.12
<b>Recarga Total</b>				<b>0.23</b>

## IV.5 Estimación de la Recarga de Retorno por Riego

### 4.5.1 Condiciones Actuales de Explotación

La cantidad de pozos desde 1970 ha aumentado en aproximadamente 5 veces. Anexo A. En la actualidad existen alrededor de 200 pozos los cuales tienen un caudal de explotación potencial distribuida como se ve en la Tabla No. IV.10.

Tabla No.IV.10. Explotación en el año 2002

USO	Caudal de Explotación (m <sup>3</sup> /día)	Caudal de Explotación (m <sup>3</sup> /año)	Caudal de Explotación (MMC/anuales)	Porcentaje de Explotación %
Arroz	162000.00	43740000	43.74	59.52
Beneficio de Café	1000.00	90000	0.09	0.12
Doméstico/Comunal	1500.00	270000	0.30	0.41
Hortalizas	127550.00	22959000	22.96	31.24
Potable	17593.56	6421649	6.40	8.71
<b>TOTAL</b>			<b>73.49</b>	

Como puede notarse en la tabla anterior, la mayor parte del consumo de agua del acuífero es para la producción de arroz, 59.52% del total, seguido de los productores de hortalizas, principalmente cebolla, zanahoria y remolacha. El uso para agua potable es de 8.71% del consumo, para la producción de arroz.

La estimación de la recarga por riego en este caso, se realizó de acuerdo al tipo de suelo en el área y su capacidad de infiltración una vez saturado, en el caso del cultivo del arroz. Tomando en cuenta que el arroz se cultiva por inundación, que los suelos de la capa superior son arcillo limosos y que las grietas en esta capa presentan una permeabilidad secundaria, se asume una recarga de retorno correspondiente al 20% del volumen de agua extraída, lo que correspondería según las épocas de explotación, a las cifras reflejadas en la Tabla No.IV.11.

Tabla No. IV.11. Condiciones de Explotación Potencial y Recarga de Retorno por Riego

Época de Explotación	Extracción MMC/ anuales	Área Regada Km <sup>2</sup>	Recarga de retorno mm	Total recarga de Retorno (MMC/anual)
1970	18.37	74.43	49.4	3.67
1980 - 1990	67.27	174.73	77.0	13.45
2002	73.49	174.73	84.1	14.69

La recarga de retorno por riego será utilizada en la etapa de verificación del modelo, donde se simularán las épocas de explotación reflejadas.

#### 4.5.2 Producción Actual y Proyectada del Campo de Pozos Para abastecimiento de Agua Potable a la Ciudad de Matagalpa.

La Tabla IV.12 muestra el caudal de explotación recomendado para el campo de pozos de Chagüitillo con el cual se realizó la primera simulación para la extracción, se asumió el bombeo por 10hrs al día, según datos proporcionados por el proyecto.

Tabla No. IV.12. Explotación del Campo de Pozos con el Caudal recomendado por el tipo de Bomba por 10 hrs. de bombeo

Código de Pozo	Caudal de Explotación (m <sup>3</sup> /h)	Horas Promedio de Bombeo	Extracción Diaria (m <sup>3</sup> /día)	Extracción anual (MMC/anuales)
S-1	48.00	10	480	0.175
S-2	100.00	10	1000	0.365
S-3	120.00	10	1200	0.438
S-4	80.00	10	800	0.292
S-5	45.00	10	450	0.164
S-6	80.00	10	800	0.292
S-7	100.00	10	1000	0.365
S-8	60.00	10	600	0.219
S-9	80.00	10	800	0.292
<b>TOTAL</b>	<b>713.00</b>		<b>6650</b>	<b>2.602</b>

Las Tablas IV.13. y IV.14, muestran la producción calculada para el campo de pozos de Chagüitillo a 5 y 10 años.

Tabla No. IV.13. Demanda máxima de agua potable Año 2005

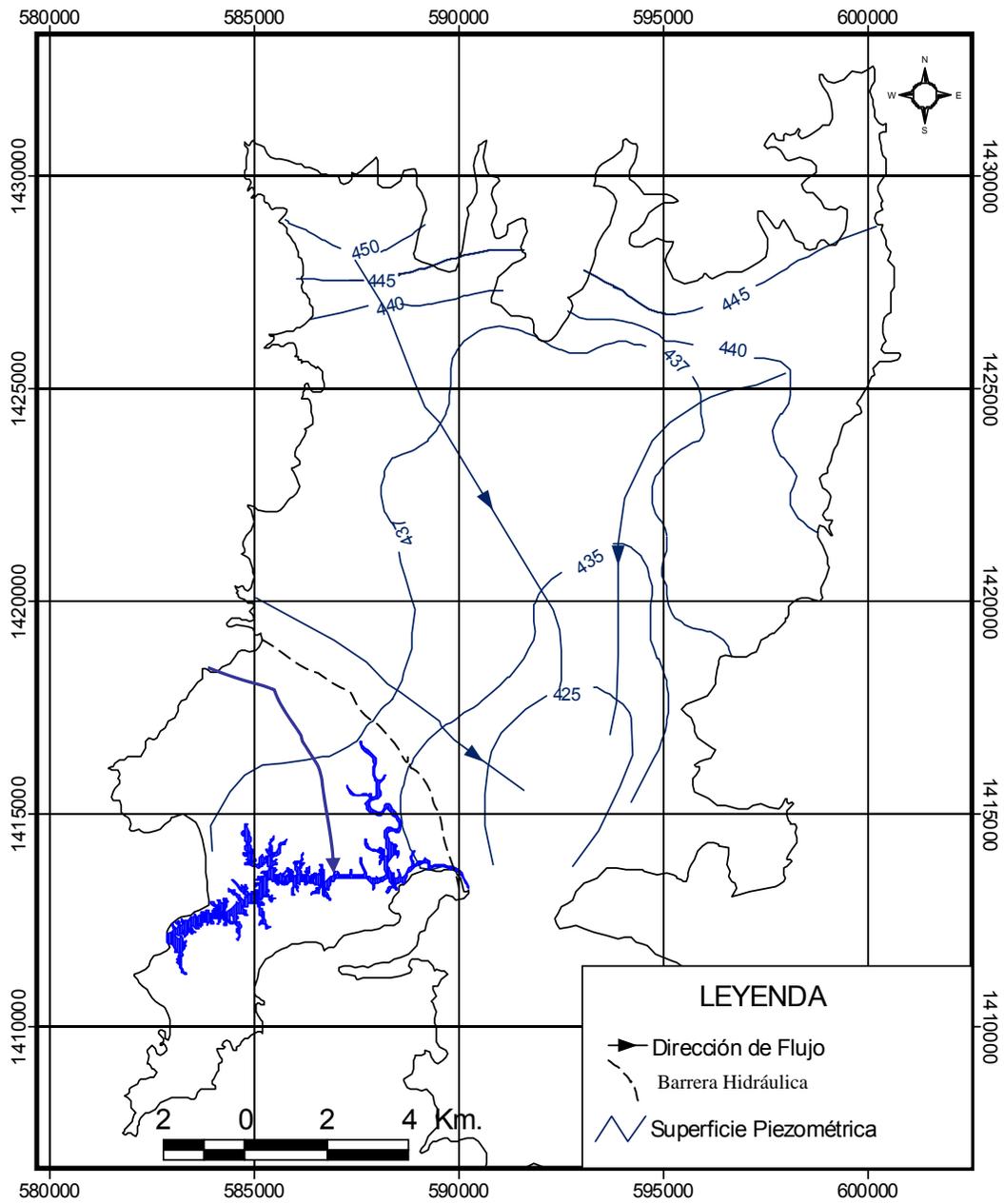
Código de Pozo	Caudal de Explotación (m <sup>3</sup> /h)	Horas Promedio de Bombeo	Extracción Diaria (m <sup>3</sup> /día)	Extracción anual (MMC/anuales)
S-1	48.00			
S-2	100.00	16.35	1635.00	0.60
S-3	120.00	16.35	1962.00	0.72
S-4	80.00	16.35	1308.00	0.48
S-5	45.00			
S-6	80.00	16.35	1308.00	0.48
S-7	100.00	16.35	1635.00	0.60
S-8	60.00	16.35	981.00	0.36
S-9	80.00	16.35	1308.00	0.48
<b>TOTAL</b>	<b>713.00</b>		<b>10137.00</b>	<b>3.70</b>

Tabla No. IV.14. Demanda máxima de agua potable Año 2010

Alternativa I sin S-1 ni S-5					Alternativa II con S-1 ni S-5				
Código de Pozo	Caudal de Explotación (m <sup>3</sup> /h)	Horas Promedio de Bombeo	Extracción Diaria (m <sup>3</sup> /día)	Extracción anual (MMC/año)	Código de Pozo	Caudal de Explotación (m <sup>3</sup> /h)	Horas Promedio de Bombeo	Extracción Diaria (m <sup>3</sup> /día)	Extracción anual (MMC/año)
S-1	48.00				S-1	48.00	18.42	884.16	0.32
S-2	100.00	21.18	2118.00	0.77	S-2	100.00	18.42	1842.00	0.67
S-3	120.00	21.18	2541.60	0.93	S-3	120.00	18.42	2210.40	0.81
S-4	80.00	21.18	1694.40	0.62	S-4	80.00	18.42	1473.60	0.54
S-5	45.00				S-5	45.00	18.42	828.90	0.30
S-6	80.00	21.18	1694.40	0.62	S-6	80.00	18.42	1473.60	0.54
S-7	100.00	21.18	2118.00	0.77	S-7	100.00	18.42	1842.00	0.67
S-8	60.00	21.18	1270.80	0.46	S-8	60.00	18.42	1105.20	0.40
S-9	80.00	21.18	1694.40	0.62	S-9	80.00	18.42	1473.60	0.54
<b>TOTAL</b>	<b>620.00</b>		<b>13131.60</b>	<b>4.79</b>	<b>TOTAL</b>	<b>713.00</b>		<b>12249.30</b>	<b>4.79</b>

#### IV.7 Descarga del Acuífero

La zona de descarga del acuífero según los datos de niveles piezométricos para la época actual, es a través del Embalse La Virgen y la zona de Ciudad Darío. Los niveles freáticos se presentan más altos en la esquina suroeste, provocando un flujo hacia Ciudad Darío. Esto podría deberse a la infiltración desde el Embalse La Virgen en la salida del Río Viejo del Valle y la poca explotación en esta zona.



**Fig.NoIV.14. Dirección de la Descarga del acuífero.2002**

## **V. MODELO NUMERICO**

### **V.1 Diseño del Modelo**

En esta etapa, los datos de parámetros y características del sistema, simplificados en el modelo conceptual son trasladados o recuperados al software del modelo matemático de la siguiente manera:

- Los mapas bases que sirven como guías para la delimitación de fronteras, y propiedades del acuífero son importados en formato \*.dxf o \*.bmp y luego definida como entrada directa al modelo.
- Para la determinación de la elevación de las capas a partir de los perfiles de los pozos se pueden trasladar en formato \*.txt, con columnas x,y,z o en formato \*.grd, con los valores ya interpolados.
- Pozos de observación – formato txt
- Pozos de explotación – son datos de entrada directa en el modelo
- Ríos - entrada directa en el modelo

#### **5.1.1 Dominio del Modelo**

El modelo utiliza el método de diferencias finitas, en los que se representa el volumen elemental de flujo. Para este efecto primeramente se discretizó el área de estudio en celdas de 1 x 1 Km., abarcando en conjunto el área de captación superficial.

Normalmente se refina la malla en el área de ríos y en el área donde se encuentran ubicados los pozos. En este caso, el refinamiento se hizo en el área del acuífero, debido a que existen pozos de producción en toda su extensión y los ríos circulan a lo largo del valle. Lo anterior justifica la disminución del tamaño de las celdas, las que se redujeron a 250 x 250 m. El tamaño de la celda en profundidad, corresponde al espesor calculado de las capas del acuífero.

Aunque se incluyó el área de captación superficial del acuífero, en el dominio del modelo, esta zona se mantiene inactiva inicialmente por considerarse de muy baja

permeabilidad. La Fig. No.V.1 muestra la distribución de la malla y dominio del modelo en superficie.

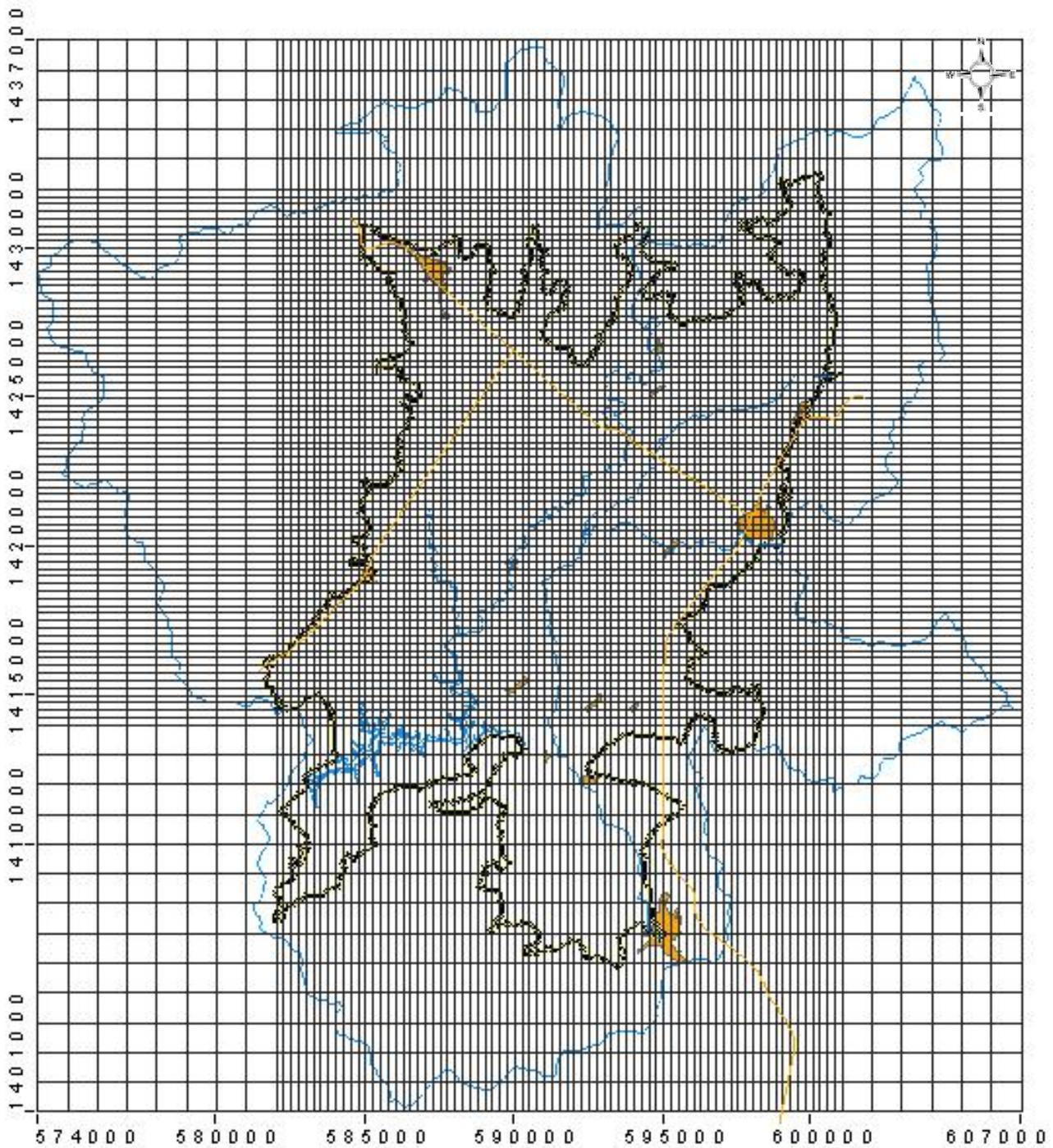


Fig. No.V.1. Dominio del Modelo y Distribución de la Malla en el acuífero Valle de Sébaco.

### 5.1.2 Capas del Modelo

De acuerdo a la agrupación realizada, correlacionado los perfiles litológicos, las características hidráulicas del acuífero y las propiedades geofísicas de los sedimentos, se ha distribuido el modelo en tres capas de superficie irregular, en función de la disposición geométrica tridimensional de éstas y las unidades hidroestratigráficas definidas.

Del techo a la base:

Capa 1: Unidad Superior de subsuelo limo - arcillosa

Capa 2: Capa Acuífera de Sedimentos aluviales (arena fina, media, gruesa, gravas y bolones)

Capa 3: Basamento arcilloso compacto y rocoso del terciario

Como base física del modelo se ha tomado la capa 3, considerada en este caso de baja permeabilidad, que se le ha asignado valores bajos de conductividad, correspondiente a arcillas compactas.

Asimismo se ha considerado los afloramientos terciarios situados en los alrededores del valle como capas impermeables. La Fig. No.V.2, muestra las capas en las que se dividió el acuífero.

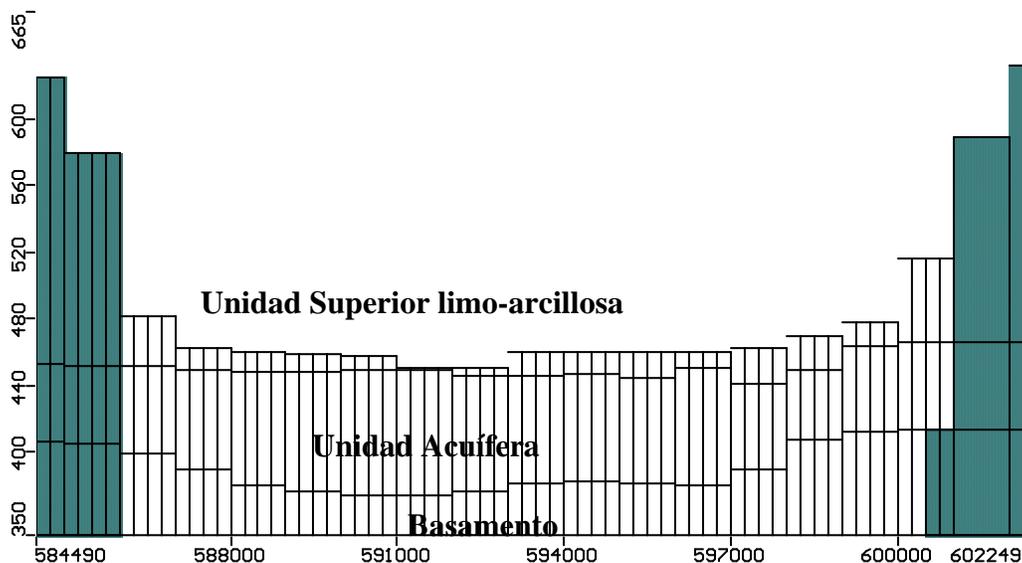


Fig. No.V.2. Capas del acuífero para el modelo matemático

### 5.1.3 Condiciones de Frontera

Se han definido los tipos de condiciones de frontera como sigue:

- **Frontera de no-flujo:** a lo largo del límite de baja permeabilidad de las formaciones volcánicas terciarias y el cuaternario, por considerarse las rocas consolidadas. Sin embargo debido al grado de intemperismo y la presencia de fracturas en estas rocas, este límite se ha extendido hacia las formaciones volcánicas en las montañas.
- **Frontera de río:** para el río Viejo y Grande de Matagalpa, se asume una conductancia calculada a partir de las formaciones del lecho y su espesor.

La fórmula para el cálculo de la conductancia es:  $C = KLW/M$

Donde

*C – conductancia del lecho del río en m<sup>2</sup>/día*

*K – conductividad del material del lecho del río (m/d), en este caso de la arena gruesa, ya que no existen datos de campo, se toma entonces los datos de la prueba de infiltración en suelo de arena gruesa (30 m/d)*

*L – longitud de la celda del río con las mismas características (m)*

*W – ancho de la celda del río con las mismas características (m)*

*M – Espesor del lecho del río (m), para el Río Grande de Matagalpa este espesor es de 0.5m y para el Río Viejo de 1m promedio.*

La conductancia calculada para el río viejo se muestra en la Tabla No.V.1, y las del Río Grande en la Tabla No.V.1.a. Estos valores son los datos iniciales al modelo.

Tabla No.V.1 Características Físicas del Cauce del Río

Espesor del lecho del río M (m)	Ancho W (m)	Longitud L (m)	Conductividad K (m/día)	Conductancia C (m <sup>2</sup> /día)
1.00	28	10	30	8400
1.00	20	10	30	6000
1.00	15	8	30	3600
Promedio				6000

Tabla No.V.1.a Características Físicas del Cauce del Río Grande de Matagalpa

Espesor del lecho del río M (m)	Ancho - W (m)	Longitud - L (m)	Conductividad K m/día	Conductancia - C m <sup>2</sup> /día
0.5	10	10	30	3000

-

- **G.H.B. Condición de Carga General:** Es similar a la condición de río, se encuentra entre las condiciones de carga dependiente y simulan flujo a través de las fronteras, de acuerdo a la conductancia y los niveles freáticos de la zona. El flujo a través de la frontera es calculado, considerando que hay una fuente constante de alimentación que pasa por esta frontera, con una conductancia definida.

$$Q_b = C_b(h_b - h)$$

$Q_b$  – Flujo a través de la frontera (m<sup>3</sup>/día)

$C_b$ - Conductancia de la frontera (m<sup>2</sup>/día)

$h_b$  – carga en o después de la frontera (m)

$h$ - carga en el acuífero (m)

- **Basamento impermeable:** Está representado por una capa de baja permeabilidad o impermeable. Debido a que se desconoce el espesor real y la profundidad de éste, se ha tomado como referencia los tres puntos de perforación del estudio de Tahal Consulting (PS-1, PS-2, PS-3), los resultados de la Técnica Geofísica y la extrapolación de los pozos, en los bordes del valle que han alcanzado la roca consolidada. Las condiciones de frontera asumida para el acuífero están reflejadas en la Fig.No.V.3.

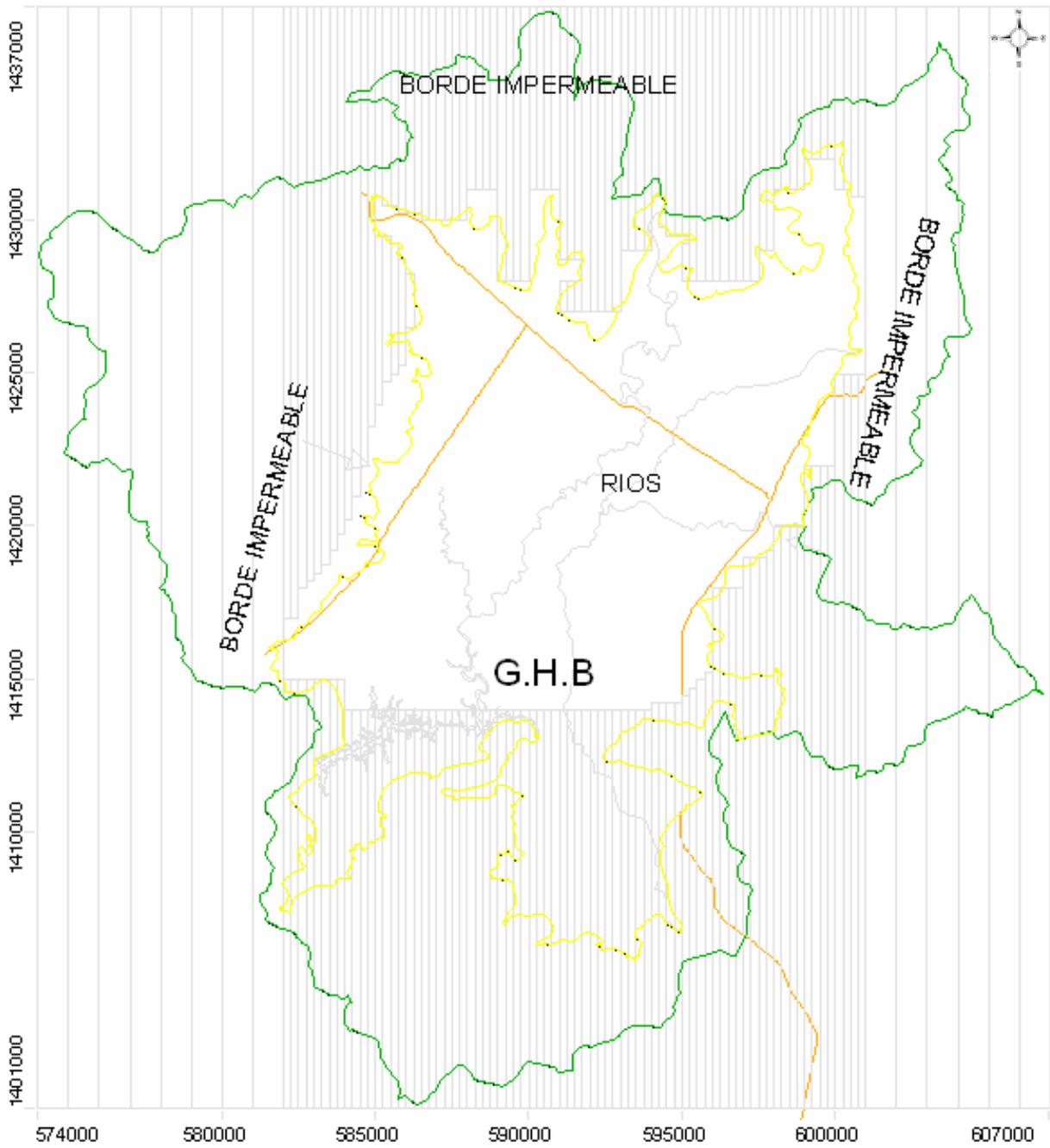


Fig. No.V.3. Condiciones de Fontera del Modelo

### 5.1.4 Zonas de Recarga

De acuerdo al tipo de suelo y los valores obtenidos, se hace la zonificación de la recarga, los datos presentados son las magnitudes de entrada preliminar al modelo numérico. La recarga mínima para el modelo serán los datos calculados en el estudio isotópico, y los máximos los calculados mediante el método analítico Schosinsky - Losilla. Ver Fig. No.V.4.

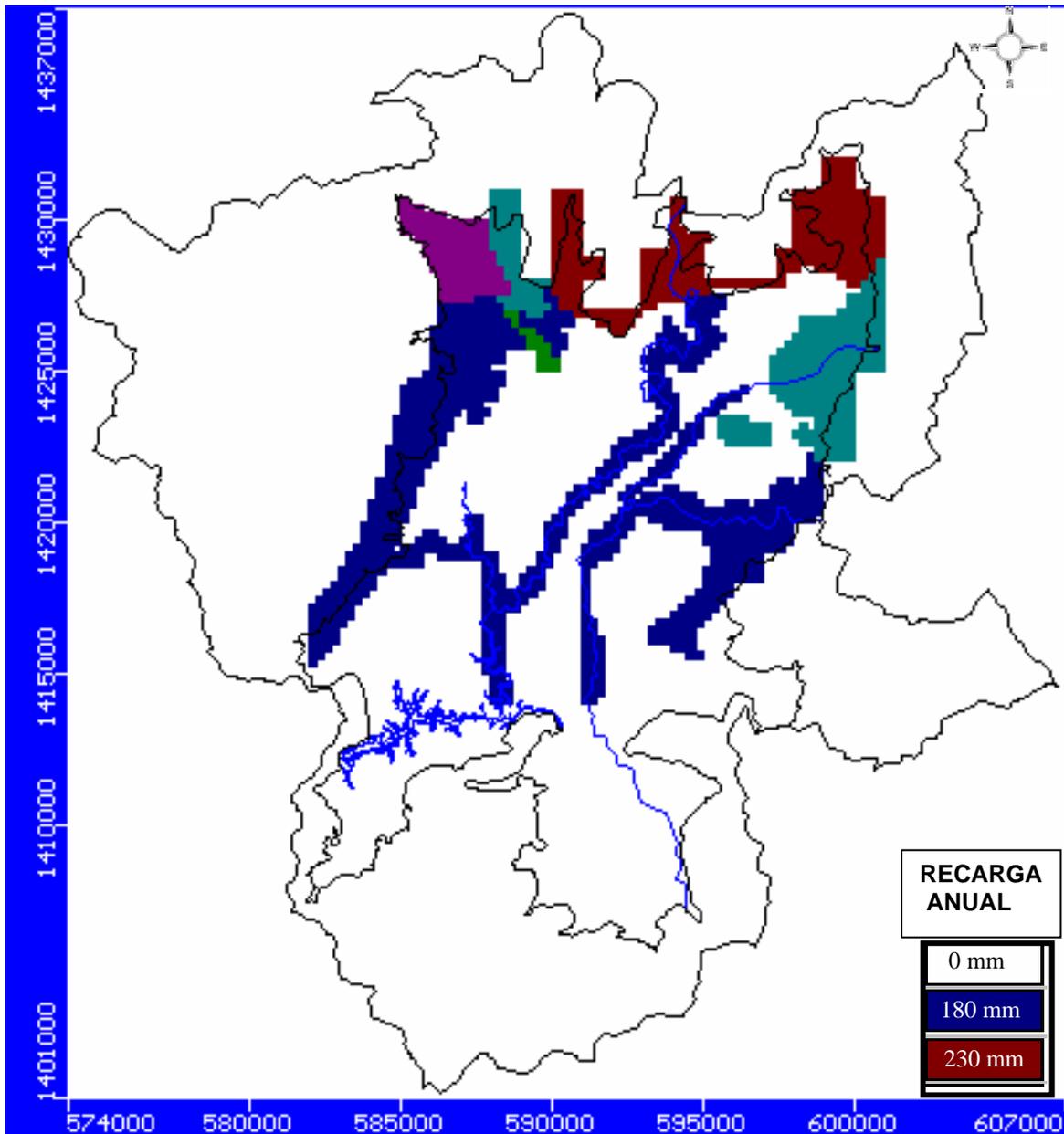


Fig. No.V.4. Zonas de Recarga Preferencial del Acuífero. Datos Iniciales de Entrada al Modelo

### 5.1.5 Conductividad Hidráulica

Los datos de conductividad hidráulica calculados y utilizados en la primera corrida del modelo fueron los promedios de los rangos reflejados en la Fig. No.V.5.

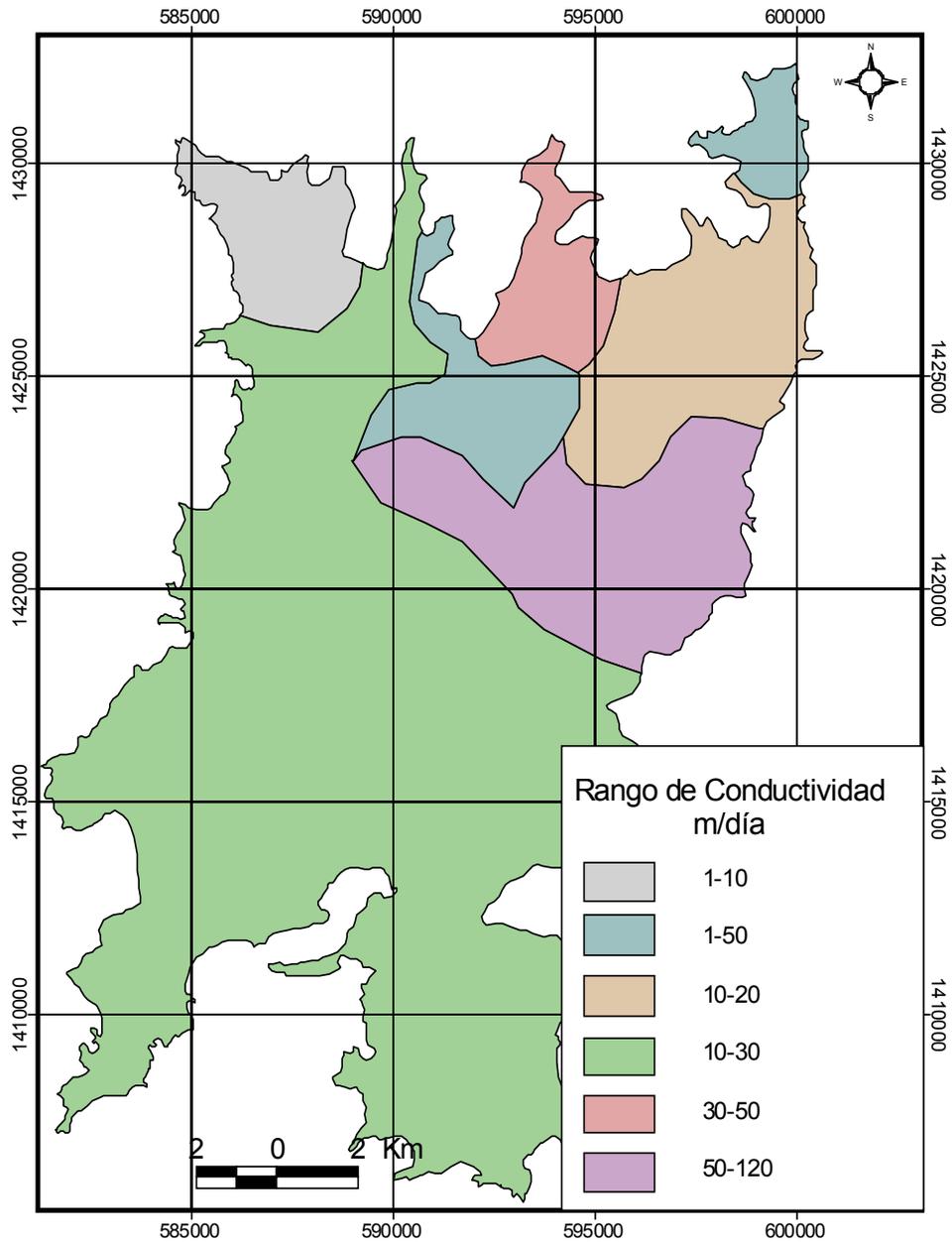


Fig.No.V.5. Distribución de la Conductividad Hidráulica del Acuífero. Datos Iniciales de Entrada al Modelo

Elaborado por Flores Y. 2003

## **V.2 Calibración del Modelo**

La calibración de un modelo de flujo, consiste en la reproducción de los datos medidos en el campo, los que son llamados valores de calibración.

La primera corrida del modelo se ejecuta con los datos calculados para el sistema, los que constituyeron, los parámetros iniciales de una sucesión de ejecuciones en las que los datos de niveles; son ajustados por el método de prueba y error dentro de los rangos de valores, hasta lograr la reproducción de los niveles observados en el campo o su máxima aproximación.

La calibración se efectuó mediante un conjunto de parámetros (condiciones de frontera, conductividad hidráulica, recarga; que satisfagan cada una de las épocas determinadas para la ejecución del modelo.

### **5.2.1 Régimen en Estado Estacionario**

Se llama régimen o estado estacionario de un sistema acuífero, cuando se ha logrado establecer un equilibrio entre sus ingresos y sus salidas, cualesquiera que éstas sean (precipitación, bombeo, etc).

En el modelo se logra reproducir el comportamiento hidráulico del acuífero, si la recarga y las descargas fueron semejantes a lo largo del tiempo, mientras el sistema se mantuvo sin explotación o explotado, por debajo de la diferencia entre ingresos y egresos.

Para la reproducción del estado natural se escogió el año 1970, dado que se cuenta con un estudio confiable de parte de Tahal Consulting, para esa época existía una explotación mínima del sistema.

Aunque las otras épocas modeladas son de fuerte explotación y en las que se considera que no se ha alcanzado un régimen estacionario, éstas se trabajan como tal por no contar con suficientes datos para la corrida del modelo en régimen transitorio o régimen de no equilibrio.

### 5.2.2 Estrategia de Calibración del Modelo

El ajuste de los parámetros, para lograr la calibración de los niveles freáticos, se realizó de acuerdo a la incertidumbre que presentaban cada uno de ellos, ya explicada anteriormente.

Para la época natural (1970), se tienen muy pocos datos de niveles observados y la mayoría están ubicados sobre la carretera Sébaco - San Isidro. No hay datos para la zona de descarga. Se cuenta con el mapa piezométrico del Proyecto Agroecológico de Tahal Consulting, y aunque están plasmados los pozos, no se refleja el nivel piezométrico de los mismos.

Los datos de observación utilizados para la calibración del modelo, se consideran representativos para cada época, se tomó en cuenta su profundidad y estación climática de medición. Estos valores representan el promedio del nivel del agua en el punto.

Se trata de ajustar los niveles piezométricos observados, a partir de los datos más influyentes en sus variaciones, como son la recarga al acuífero y la conductividad hidráulica.

Para obtener la calibración del modelo se ha trabajado sobre:

- El volumen de recarga se trabajó en los rangos comprendidos entre el valor de recarga más bajo, que corresponde a la calculada por Plata A. (1988) y el valor obtenido mediante la fórmula analítica Schosinsky – Losilla, los que resultaron bastante altos.
- Los valores de conductividad hidráulica, por las razones anteriormente apuntadas y debido a la incertidumbre de los datos, según los cálculos, se trabajara entonces con rangos teóricos para las formaciones litológicas.
- La Frontera de Carga General G.H.B, varió de acuerdo a las cargas hidráulicas obtenidas para cada época, en esta frontera.

La Tabla No.V.2 resume el grado de incertidumbre para cada uno de los parámetros utilizados, en la etapa de calibración.



### **a) Condiciones de Frontera**

Las condiciones de frontera del modelo utilizadas y modificadas en el proceso de calibración son:

#### **- Dominio del Modelo**

No hay datos de campo, ni mediciones que indiquen la influencia de las rocas permeables en la recarga del acuífero, sin embargo el nivel de meteorización y grado de fracturamiento observado le confieren un grado de incertidumbre media a las fronteras naturales, Foto No.3



Foto No.3. Grado de Meteorización y Fracturamiento de las rocas terciarias

El contacto entre las rocas terciarias y el cuaternario, considerado como condición de frontera de no flujo; primeramente, se extendió en la etapa de calibración, debido al aporte de agua, en zonas de transición geológica. Donde se refleja un paralelismo de las curvas isofráticas a estas formaciones y que se reprodujeron únicamente al extender el dominio del modelo hacia las rocas volcánicas terciarias en las montañas.

Este dominio fue extendido en 1km aproximadamente hacia las montañas, donde se presenta altos grados de intemperización y fracturamiento, lo que produce un escurrimiento subsuperficial al acuífero.

En la tercera capa no se extendieron las fronteras a las rocas volcánicas terciarias, debido al desconocimiento de la profundidad de las fracturas.

#### – **Basamento Impermeable**

La determinación del basamento impermeable a partir de los registros litológicos del acuífero, fue modificado en la etapa de calibración del modelo, únicamente en las áreas ubicadas en la parte noreste del valle, en San Isidro. Con los valores de elevación estimados preliminarmente, las cargas hidráulicas calculadas estaban muy por encima de las observadas, dándole carácter surgentes, condición imprecisa para el acuífero.

Cuando se bajó en 5m, los niveles se estabilizaron. Los cambios mencionados fueron realizados después de trabajar los rangos de conductividad y recarga, que no lograron reproducir los niveles observados.

#### – **Capas del Modelo**

El número y la elevación de las capas no fueron cambiados en ninguna de las etapas de calibración del modelo, excepto los cambios mencionados en el acápite de basamento impermeable.

#### – **Frontera de Carga General (G.H.B)**

Cada etapa utilizada para la verificación presenta niveles piezométricos diferentes, lo que hace variar el flujo hacia o desde esa frontera. Se utilizó una conductancia igual a la calculada del río de  $4000 \text{ m}^2/\text{día}$ . No fue necesario cambiarla durante el período de calibración.

Para la zona de descarga, donde se utilizó la condición de G.H.B, se reajustaron los valores de cada etapa de explotación, de acuerdo a las diferentes elevaciones del nivel piezométrico en esta línea de frontera.

#### – **Ríos**

Los valores de conductancia que lograron calibrar con más aproximación los datos de niveles observados para las diferentes épocas, fueron de  $1000 \text{ m}^2/\text{día}$ , los que están por debajo de los valores calculados.

## **b) Recarga**

La recarga se aplica sólo y directamente sobre la capa superior.

Los suelos vertisoles tienen la característica de comprimirse, al perder humedad durante la época seca, presentando un sinnúmero de grietas; por donde puede ocurrir la recarga al acuífero.

Las pruebas de infiltración dan un valor de referencia para el agua que realmente penetra al acuífero, ya que se realizan en los primeros horizontes del suelo, por otro lado analizando los perfiles litológicos, no se presenta un horizonte arcilloso uniforme, sino que el subsuelo contienen limo y arena fina en la mayoría de los casos.

Los datos de recarga natural, fueron ajustados en los rangos ya señalados en la Estrategia de Calibración. La Fig.No.V.6, muestras los valores de recarga, con los que se logró calibrar los datos de niveles freáticos.

La Tabla No.V.3 muestra la recarga calculada y la recarga usada en el modelo:

Tabla No.V.3. Comparación Recarga calculada vs Recarga de calibración

<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>RECARGA POTENCIAL CALCULADA (mm)</b>	<b>RECARGA DE CALIBRACION (mm)</b>
Vertisol	0 – 400	10
Arenoso – (San Isidro)	100-500	200
Aluvial (En el cauce de los ríos)	100-400	200
Chagüitillo	100-500	200

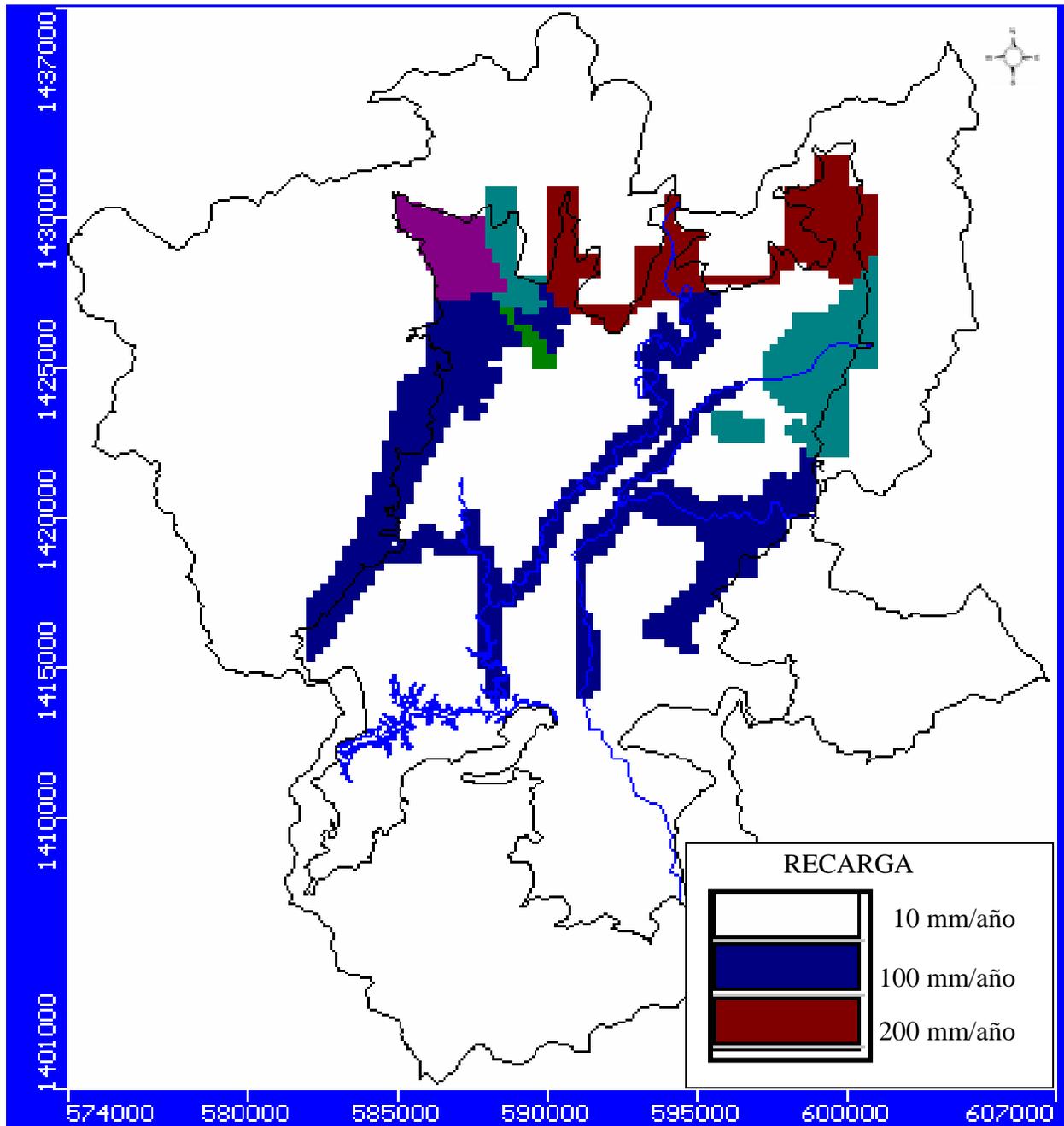


Fig. No.V.6. Zonas de Recarga utilizadas en la Calibración del Modelo

### **c) Conductividad Hidráulica**

Los parámetros de conductividad hidráulica calculados a partir de las pruebas de bombeo, fueron ajustados tomando en cuenta lo siguiente:

- La proximidad de los pozos a los ríos
- El espesor de la capa permeable
- El efecto de penetración parcial de los pozos
- Los datos teóricos
- El grado de meteorización y fracturamiento de las rocas

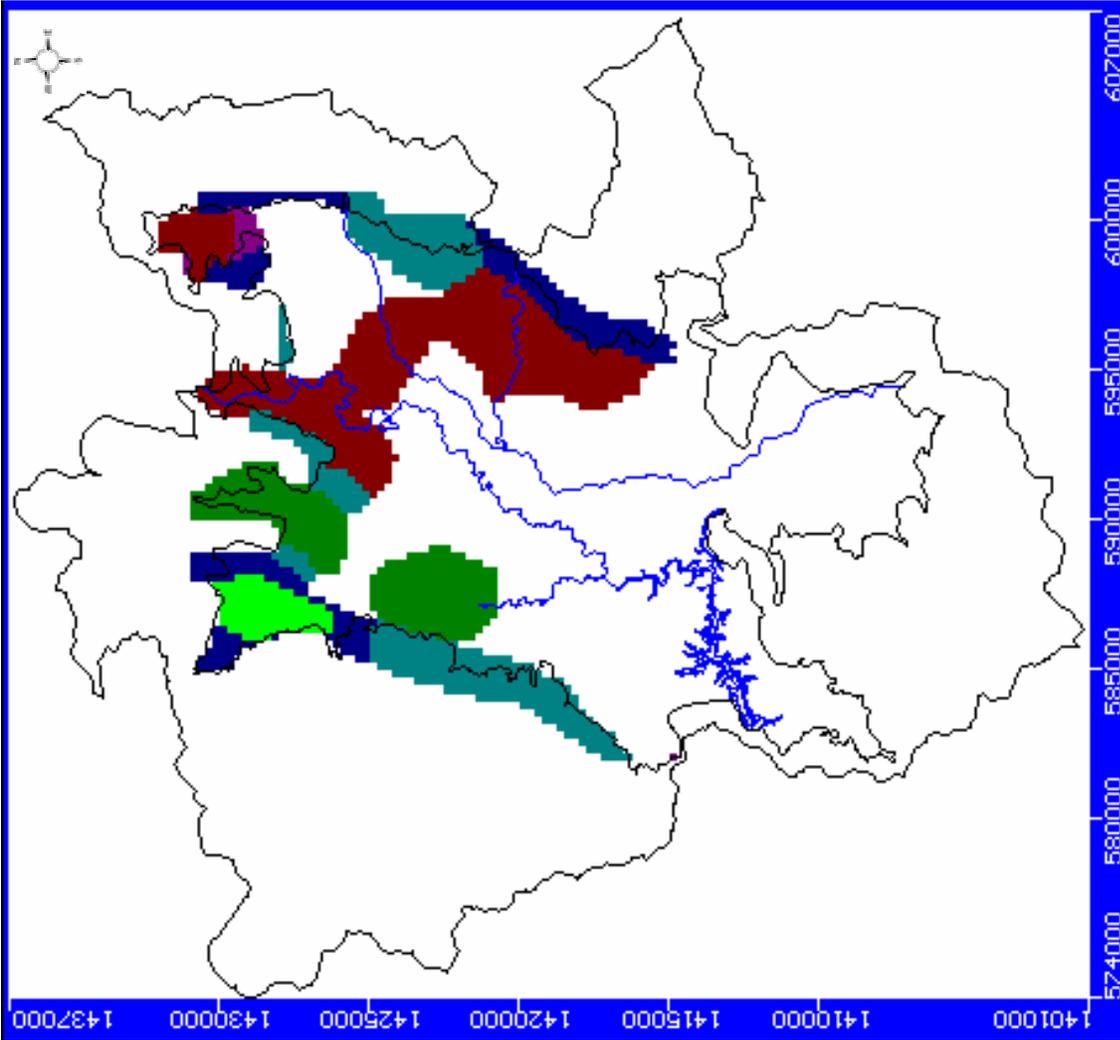
Los valores finales de calibración del modelo son los reflejados en la Tabla No.V.4:

Tabla No. V.4. Valores de Conductividad Hidráulica para la calibración del modelo

Medio Hidrogeológico	Valores de Conductividad Hidráulica a utilizadas en el modelo (m/d)
Limo	1 – 3
Medio Fracturado, intemperizado	1
Arena limosa	3 – 5
Arena	10 -150

En el mapa de conductividad hidráulica, Fig.No.V.7, está representada la segunda capa, correspondiente a la capa acuífera. Los valores de conductividad vertical fueron tomados en 1/10 de la conductividad horizontal. Estos no fueron cambiados para la etapa de calibración.

La capa superior limoarcillosa se calibró con un valor de 1m/día. Los valores de conductividad horizontal de 0.12m/d, se asignó a la capa inferior considerada como el basamento impermeable, puede observarse entonces una diferencia en un orden de magnitud entre el acuífero y el basamento, esto puede confirmar la hipótesis de Plata A. (1988), que considera que el acuífero descarga a través del basamento por fallas, grietas y fracturas.



Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	Color
30	30	3	White
4	4	0.4	Dark Blue
50	50	5	Green
1	1	0.1	Teal
80	80	8	Red
15	15	1.5	Purple
0.12	0.12	0.012	Grey
1	1	0.1	Blue

Fig. No.V.7. Distribución de las Conductividades Hidráulicas utilizadas en la Calibración del Modelo

### 5.2.3 Resultados de la Calibración

Para la época natural los niveles observados en el campo se lograron ajustar con un error normalizado de 6.55% y un error absoluto de 1.48m, los que se consideran aceptables dada la incertidumbre de los datos.

#### – Balance Hídrico Subterráneo

Tabla No.V.5. Balance Hídrico Subterráneo. Época natural, 1970

Componente del Balance Hídrico	Entrada MMC/año	Salida MMC/año
Pozos	0	0
Recarga	13.61	0
Río	3.34	8.42
Carga General - G.H.B	0.0344	8.57
<b>Total</b>	<b>16.984</b>	<b>16.98</b>

Puede observarse en la Tabla No.V.5, que el río aporta agua al acuífero en algunas zonas y en otras se alimenta de éste. El carácter de descarga del agua subterránea (salida), o aporte al río para la época natural de 1970, se da a la salida sur del área de estudio; donde los niveles piezométricos estaban al nivel del río o sobre éste.

Por otro lado, en las parte alta y media del valle, los niveles piezométricos se encuentran por debajo del lecho del río, lo que significa recarga del río hacia el acuífero (entrada).

De la frontera de carga general hay entrada de agua, esto principalmente desde la orilla este del Embalse La Virgen hacia Ciudad Darío; por lo que el modelo revela que la descarga del acuífero se realiza principalmente por la zona de Ciudad Darío. El Gráfico No.V.1. muestra las cargas calculadas vs. observadas para la época considerada de baja explotación (1970).

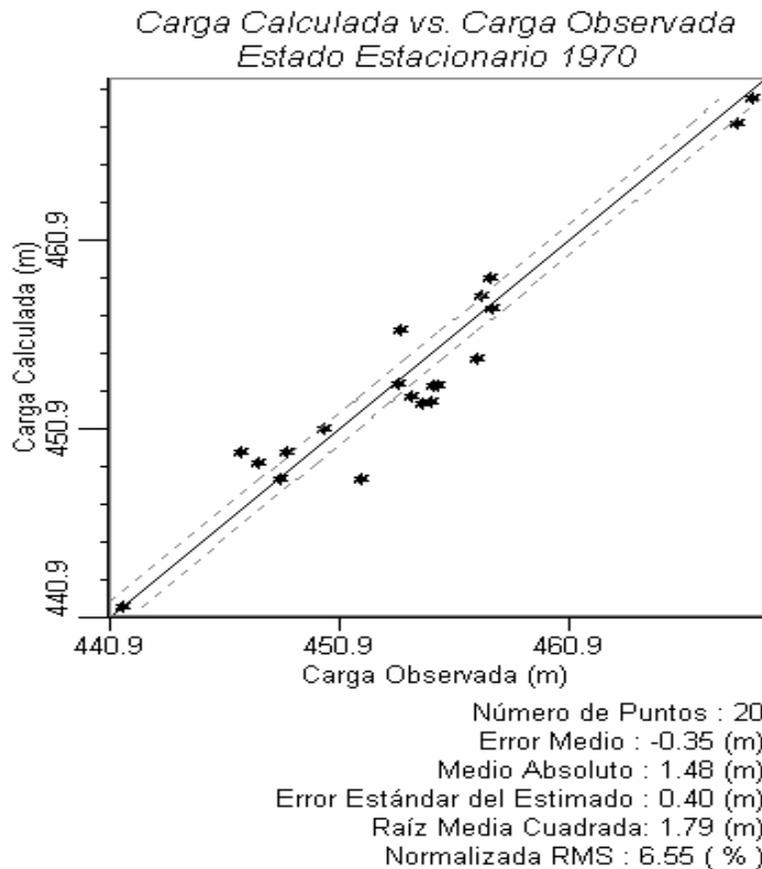


Gráfico No.V.1. Calibración de Carga Hidráulica. Época Natural. 1970

### V.3 Verificación del Modelo

Para efectos de verificación del modelo se trabajó en dos períodos de explotación del acuífero; en 1980-1990, 2000. Debido a falta de registros continuos de los años después de 1970 hasta 1990, se ha tomado el promedio de niveles de la época 1980-1990; valorando que las variaciones no hayan sido significativas.

Las perforaciones para abastecimiento de agua potable funcionan todo el año en forma prácticamente continua, mientras las perforaciones que abastecen sistemas de riego trabajan durante la época seca; pero por ser el valle, una zona de baja precipitación, este período se extiende hasta 8 meses. Los volúmenes de bombeo, están calculados de forma que reflejen un abastecimiento anual. Actualmente existe un bajo desarrollo agrícola en el Valle. Anexo A.

La verificación del modelo matemático consistió en la reproducción de los niveles estáticos de los diferentes períodos mencionados.

Los datos utilizados para la calibración de la época natural, fueron usados en la verificación del modelo, la diferencia se obtuvo únicamente en las condiciones de recarga, que de acuerdo al volumen de explotación se calculó un porcentaje de recarga de retorno de 20%, esta fue la única condición cambiada para las diferentes épocas.

A pesar que la primera capa ha sido considerada en los diferentes estudios como impermeable, se ha demostrado en este estudio que sin la lixiviación del agua de riego hacia el acuífero, con los parámetros obtenidos; el acuífero habría disminuido drásticamente sus niveles piezométricos.

La recarga de retorno por riego, se ajustó a los datos calculados de recarga por el método analítico Schosinsky – Losilla, el cual toma en cuenta los cultivos de la zona.

### **5.3.1 Recarga de Retorno por Riego**

Los Vertisoles son suelos que se desarrollan en climas tropicales y subtropicales, con una marcada diferencia entre estaciones seca y húmeda. Estas condiciones ambientales favorecen la formación de arcillas, que tienen la propiedad de hincharse cuando están húmedas y encogerse al secarse. La superficie del suelo en época seca, presenta grietas que llegan normalmente hasta 50 cm de profundidad.

En zonas donde el riego a los campos de arroz, se realiza a partir de aguas superficiales, los niveles de agua subterránea se han incrementado y se ha detectado contaminación por agroquímicos. En el caso del Valle de Sébaco en el estudio de González R. 2004, se detectó la presencia de agroquímicos en todos los pozos analizados, lo que evidencia la lixiviación del agua de riego al acuífero; esto es posible especialmente en zonas donde la capa superior limoarcillosa es de poco espesor, donde las grietas son profundas o donde hay un alto porcentaje de material de granulometría gruesa.

Para las épocas con extracción para riego el ajuste del modelo, se realizó con la recarga de retorno por riego. Los valores utilizados se aproximan a los calculados

mediante el método Schosinsky-Losilla, para la recarga en suelos vertisoles cultivados. Debe anotarse que el cálculo del caudal de explotación no es exacto ya que no se midió en todos los pozos y se estimó de acuerdo al reporte de Tahal, (1977), de lo expresado por los productores y de la necesidad de riego por tipo de cultivo.

### 5.3.2 Niveles Piezométricos

La calibración de los niveles piezométricos para las diferentes épocas de explotación está reflejada en los Gráficos Nos.V.2 y V.3. En estos se puede observar el ajuste realizado, mediante la comparación entre los niveles calculados y observados para la época de explotación 1980-90 y 2002.. El mapa de superficies piezométricas para la época de verificación 1980-90 se encuentra en Anexo B.

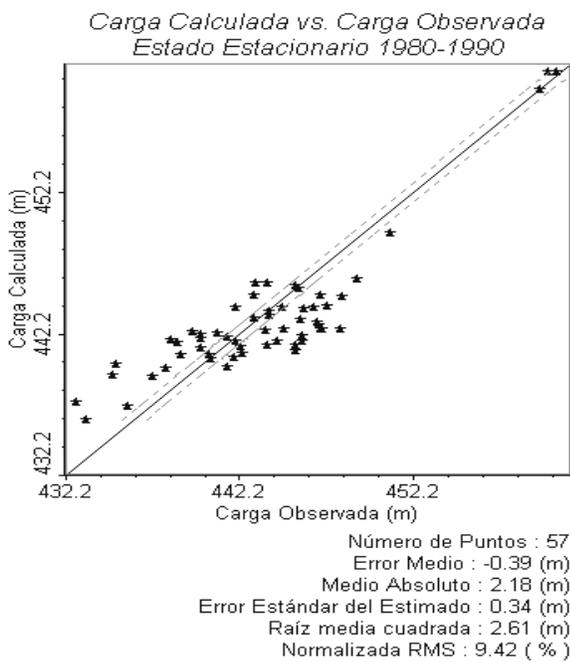


Gráfico No.V.2 Calibración de Carga Hidráulica. Época 1980 - 1990

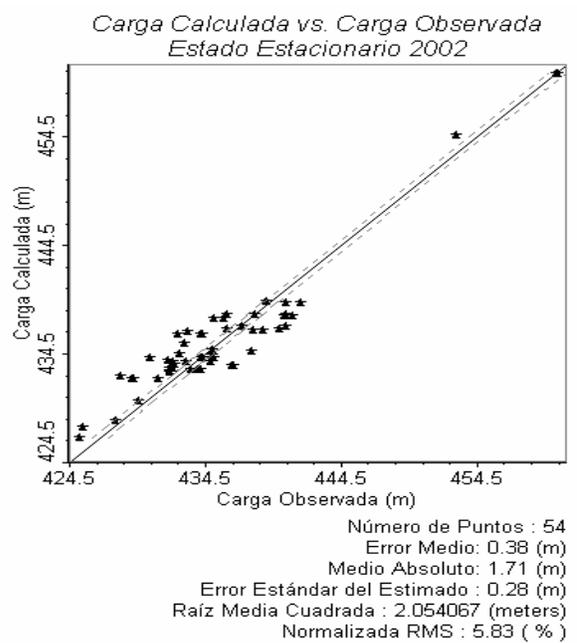


Gráfico V.3. Calibración de Carga Hidráulica. Época 2002

De los gráficos anteriores, puede observarse que se ha logrado un ajuste satisfactorio de los niveles observados. Debe tenerse en cuenta las condiciones dinámicas constantes en las que se mantiene el acuífero y que éste se ha simulado en estado estacionario, debido a la carencia de datos, por lo que los errores

obtenidos son aceptables. En la mayoría de los casos los pozos de observación son los mismos de explotación.

Los errores oscilan medios absolutos oscilan entre 2.16 y 1.71. El error máximo absoluto para las diferentes épocas lo encontramos en las épocas de mayor explotación con un valor de 2.18m y se encuentra uniformemente distribuido en todo el valle. La Tabla No.V.6, muestra los errores de calibración para las diferentes épocas de explotación, que se han señalado como valores aceptables para la calibración en estado estacionario, de un acuífero activo, como es el Valle de Sébaco en el que se asume un estado de transiente o de no equilibrio.

Tabla No. V.6. Resumen de los Errores obtenidos para las diferentes épocas de simulación

EPOCA SIMULADA	ERROR MEDIO (m)	ERROR MEDIO ABSOLUTO (m)	ERROR ESTÁNDAR ESTIMADO (m)	RAIZ CUADRADA MEDIA (m)	NORMALIZADO RMS (%)
NATURAL – 1970	-0.35	1.48	0.40	1.79	6.55
1980-1990	-0.39	2.18	0.34	2.60	9.42
2002	0.38	1.71	0.28	2.05	5.80

### 5.3.3 Balance Hídrico

La Tabla No.V.7 muestra los balances hídricos obtenidos para todas las épocas simuladas, puede verse la evolución que han tenido los diferentes componentes del balance.

Tabla No.V.7. Balance Hídrico Subterráneo para las diferentes épocas simuladas

Componente del Balance Hídrico	1970		1980-1990		2000	
	Entrada MMC/año	Salida MMC/año	Entrada MMC/año	Salida MMC/año	Entrada MMC/año	Salida MMC/año
Pozos	0.00	0.00	0.00	34.92	0.00	32.85
Recarga	13.61	0.00	35.21	0.00	32.86	0.00
Río	3.34	8.42	2.91	2.97	4.59	0.59
G.H.B	0.03	8.57	2.39	2.62	0.49	4.50
<b>Total</b>	<b>16.98</b>	<b>16.98</b>	<b>40.50</b>	<b>40.50</b>	<b>37.95</b>	<b>37.95</b>

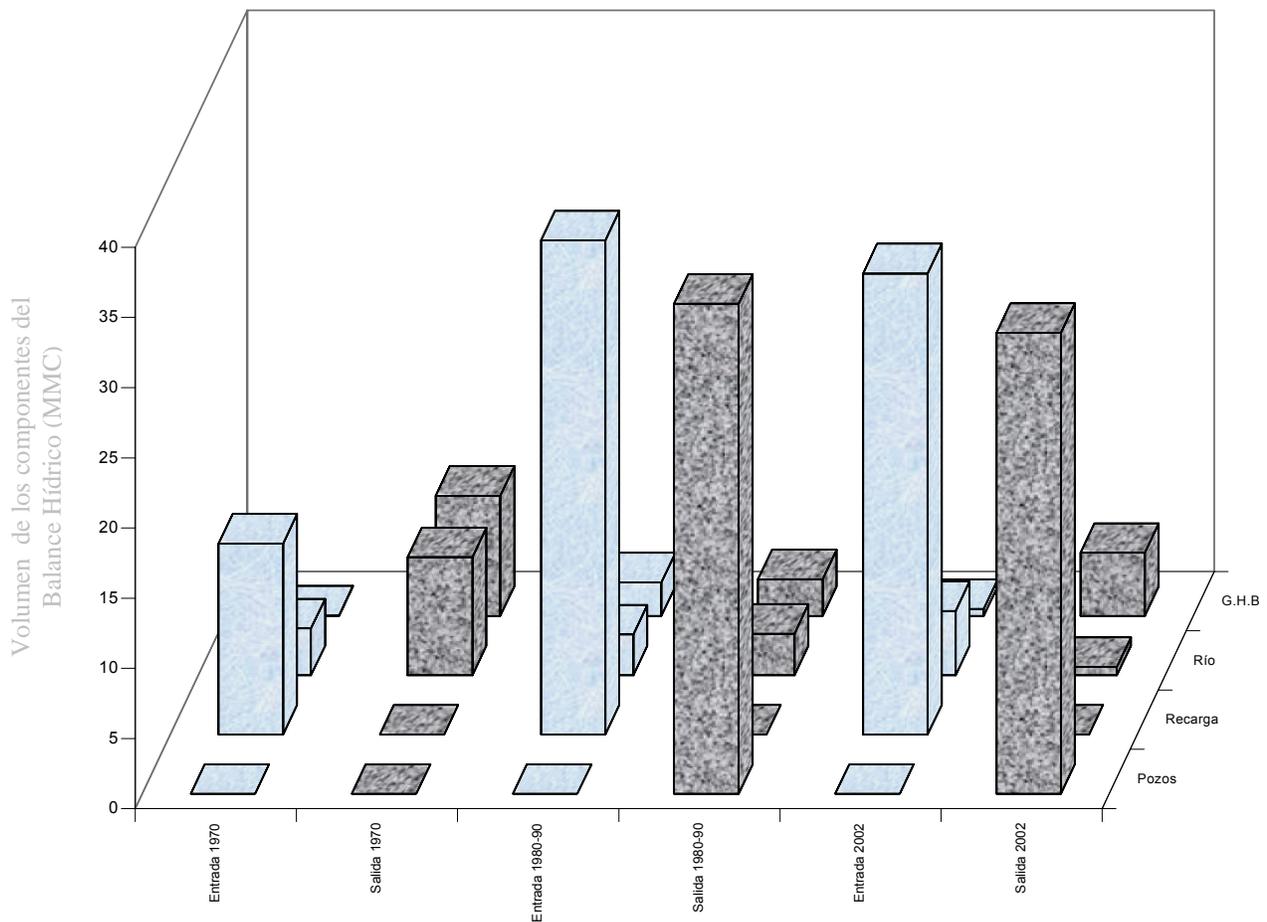


Gráfico No.V.4. Balance Hídrico Subterráneo para las diferentes épocas

De la Tabla No.V.7 y Gráfico No. V.4, podemos concluir lo siguiente:

Para la época natural:

- La recarga principal para la época de simulación natural, se realiza directamente por precipitación (13.61MMC/anales), un poco a través del lecho del río (3.34 MMC/anales).
- Del embalse la virgen la entrada de 0.034MMC/anual, en la época de baja explotación, esto provoca flujo de agua hacia Ciudad Darío. Esto se refleja en la entrada desde la frontera de Carga General.
- Desde el río se infiltra 3.34 MMC/anales.

- La descarga se realiza por la parte baja de los ríos en Ciudad Darío y El Embalse La Virgen.
- La disponibilidad de agua para la época natural se calculó en 16.98MMC.

Para las épocas de explotación utilizadas en la etapa de verificación es necesario anotar lo siguiente:

- La recarga aumenta en 21.6MMC, que representa más del doble de la recarga natural, como consecuencia la recarga de retorno por riego.
- La infiltración desde el río disminuye en las épocas de 1980, debido que el agua que corre por su cauce, es bombeada y utilizada en los campos de regadío. Así mismo el caudal que descarga al río disminuye ya que es captado por los pozos de explotación.
- Para el año 2002, por el contrario, aumenta la infiltración desde el río, debido a que la mayoría de las bombas colocadas sobre su cauce fueron retiradas, por lo que la entrada de agua, desde éste al acuífero aumenta. Otra razón obedece a que los pozos han dado su vida útil y el bombeo ha disminuido a causa de obstrucción, corrosión etc.
- Hay infiltración desde los ríos y desde el embalse la virgen, que compensa la extracción desde las reservas del acuífero.
- Para la época actual simulada (2002), los parámetros del balance hídrico total se reducen, producto de la recesión en el auge productivo agrícola, después de 1990; lo que disminuyó la entrada desde la frontera de carga general y la entrada por recarga de retorno, y algunos pozos de abastecimiento al sur del acuífero también fueron cerrados por problemas de contaminación.
- El potencial total del acuífero en las condiciones actuales de recesión, es de 37.95MMC/anuales.

El auge arrocero en el área está perfectamente reflejado en la época de 1980, la cantidad recargada al acuífero se incrementó, a partir del excedente utilizado para

riego. Se ha considerado la puesta en marcha de la presa de Apanás, donde los agricultores utilizaron el agua del río viejo para riego, por lo que había más agua proveniente del exterior de la cuenca. Por otro lado, este uso, se ha mantenido con los mismo volúmenes de circulación por el río, pero la explotación ha crecido, lo que conlleva a una disminución de los volúmenes de agua que circulan por el acuífero.

### **V.5 Superficie Piezométrica**

Las superficies piezométricas obtenidas manualmente, no fue posible reproducirlas fielmente en el modelo, especialmente en la zona de explotación pronunciada y de descarga del acuífero, por las siguientes razones. Fig.No.V.8:

- Los pozos de observación son los mismos de producción, el nivel medido no refleja un estado de equilibrio completo.
- Hay interferencia entre pozos por la poca distancia en que se encuentran unos de otros, en algunos casos menos de 100m, asumiendo que el acuífero es altamente dinámico.
- Es claro que en la simulación realizada, refleja más que un estado estacionario, un estado cuasi-estacionario o semiequilibrio.
- Las pruebas de bombeo no fueron realizadas con las especificaciones de investigación necesarias, para reflejar las características dinámicas del acuífero. Ejemplo: Pruebas de bombeo de larga duración – 24 horas.
- El desconocimiento de la posición de la rejilla, supone un nivel promedio del agua en las unidades hidroestratigráficas penetradas en los pozos.

Sin embargo, se definen claramente las zonas de recarga y descarga del acuífero, así como también las zonas de baja permeabilidad de las rocas circundantes.

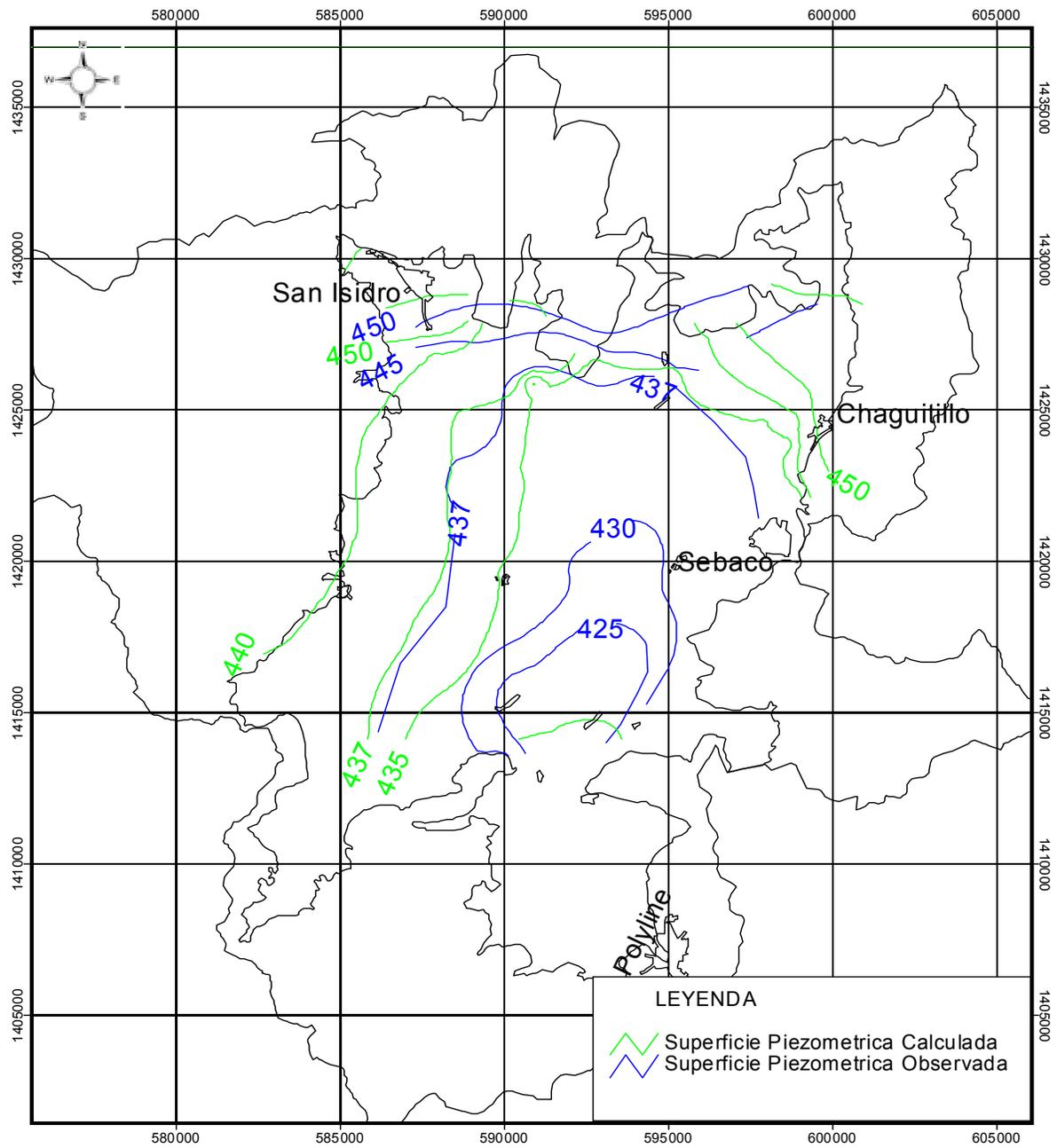


Fig. No.V.8. Comparación Superficie Freática simulada y Observada. 2002

## V.6 Análisis de Sensibilidad del Modelo

El análisis de sensibilidad se realizó mediante la entrada de valores contenidos en el rango, reflejado en la Tabla No.V.2.

### 5.6.1 Recarga

El análisis de sensibilidad para la recarga se basó en el error del método del Balance Hídrico de Suelos, se simuló entonces en un rango de  $\pm 25\%$  a partir de la recarga de calibración. La Tabla No.V.8, muestra los valores de Recarga utilizada para el análisis de Sensibilidad del Modelo.

Tabla No.V.8 Recarga utilizada para el análisis de Sensibilidad del Modelo

TIPO DE SUELO	RECARGA DE CALIBRACION (mm)	RECARGA SIMULADA +25% (mm)	RECARGA SIMULADA --25% (mm)
Vertisol	10	12.5	7.5
Arenoso – (San Isidro)	200	250	150
Aluvial (En el cauce de los ríos)	100	125	75
Chagüitillo	200	250	75

### 5.6.2 Conductividad Hidráulica

La simulación, para el análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica, se realizó en el rango de valores de la Tabla No.V.2 (V.2 Calibración del Modelo). El resultado obtenido se resume en la Tabla No.V.9

Tabla No.V.9. Resultado del Análisis de Sensibilidad

Parámetros de Comparación	Valores de Calibración Estado Estacionario 2002	Recarga Alta (mm)	Recarga Baja (mm)	Conductividad Baja	Conductividad Alta	Recarga Alta Conductividad Alta	Recarga Baja Conductividad Baja
		125-250	75-150	Valores en Tabla No.V.2	Valores en Tabla No.V.2	Valores en Tabla No.V.2	Valores en Tabla No.V.2
Error Medio (m)	0.38	1.55	-3.95	1.93	-1.14	1.44	-4.13
Medio Absoluto (m)	1.71	2.29	4.07	2.41	2.05	2.31	4.35
Error Estándar del Estimado (m)	0.27	0.31	0.33	0.34	0.31	0.32	0.36
Raíz Media Cuadrada (m)	2.05	2.73	4.62	3.16	2.56	2.71	4.89
Normalizado RMS (%)	5.83	7.74	13.09	8.96	7.27	7.64	13.86

Puede verse de la tabla anterior que la mayor sensibilidad del modelo es la recarga, ya que aunque se trabajó con los menores valores de conductividad para lograr el ajuste de niveles observados, esto no se logró al trabajar con valores bajos de recarga. Cualquier acción encaminada a la recuperación del acuífero debe dirigirse a aumentar la recarga directa, a través de inducción indirecta de aguas superficiales.

### **V.7 Simulación del Efecto Provocado por el Campo de Pozos de Chagüitillo**

Una vez calibrado el modelo, con los parámetros de recarga y conductividad, es posible dar la respuesta del acuífero a simulaciones futuras.

El incremento de pozos nuevos en el acuífero, prácticamente no se realiza, hasta que éstos hayan dado su vida útil; es decir, no se ha aumentado el número de pozos en los últimos años; sino que, se han perforado nuevos, solamente para sustituir los que por una u otra razón han bajado su rendimiento, (obstrucción de las rejillas por oxidación, etc.). Por esta razón la simulación se realizó con los pozos activos, más los de abastecimiento de la ciudad de Matagalpa en Chagüitillo.

Se tomó en cuenta que el agua a ser extraída del campo de pozos, a diferencia de los pozos para la actividad agrícola, es agua que no retorna en ningún porcentaje, sale o se pierde del total de reservas acumuladas del acuífero. Por lo tanto no se aumentó la recarga de retorno.

La primera simulación se realizó con los caudales de la demanda máxima de agua potable para el año 2005, reflejadas en la Tabla No.IV.13, (en IV.6 Producción Actual y Proyectada del Campo de Pozos Para Abastecimiento de Agua Potable a la Ciudad de Matagalpa).

Se supone que los pozos de producción existentes no aumentarán para esta fecha y que su caudal de explotación se mantendrá.

El resultado de esta simulación tiene como consecuencia una baja en los niveles de aproximadamente 5m. Sin embargo esta disminución solamente se extiende hasta la parte norte del acuífero, según se refleja en las figuras Nos. V.9 y V.10.

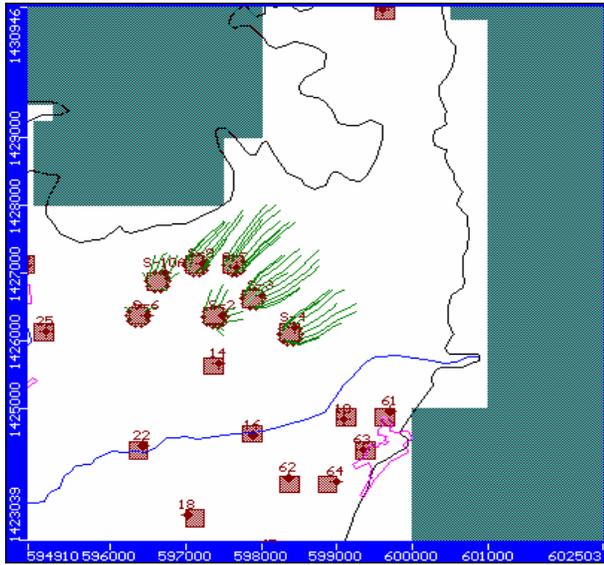


Fig. No.V.9. Zona de Captura del Campo de Pozos de Chaguitillo. 2005.

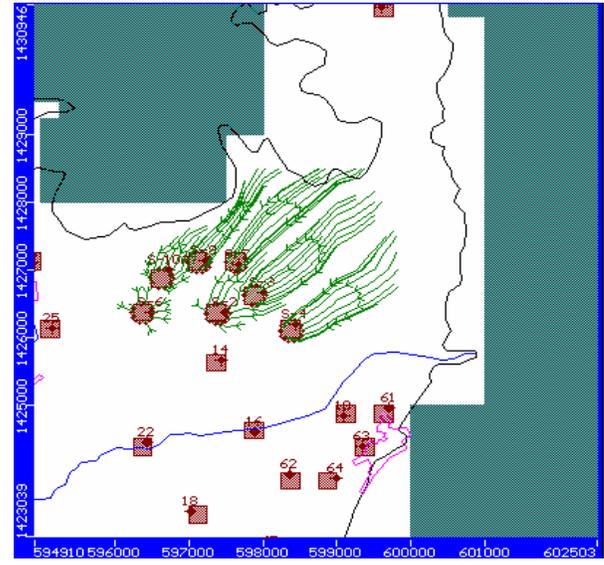


Fig. No.V.10. Zona de Captura del Campo de Pozos de Chaguitillo.2010

Sin embargo estas zonas de captura de los pozos abarcan el agua de regadío de la capa superior, claramente se refleja en la Fig.No.V.11 a y b. Las líneas azules indican entrada de agua desde la superficie.

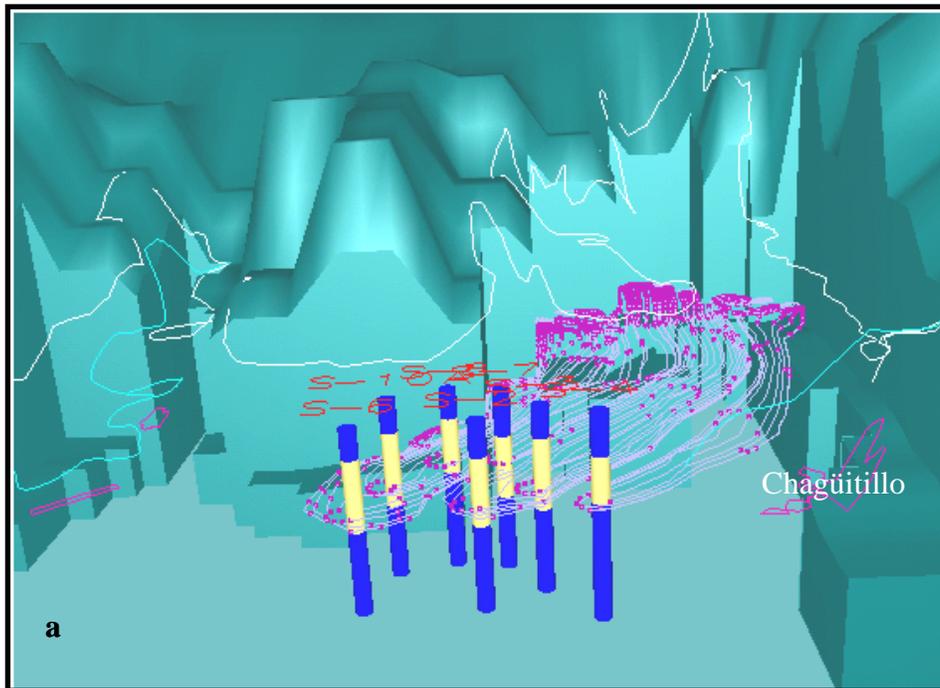


Fig. No.V.11.a. Zona de Captura del Campo de Pozos de Chaguitillo. a- Vista en Tres dimensiones, cada marca indica 10 años.

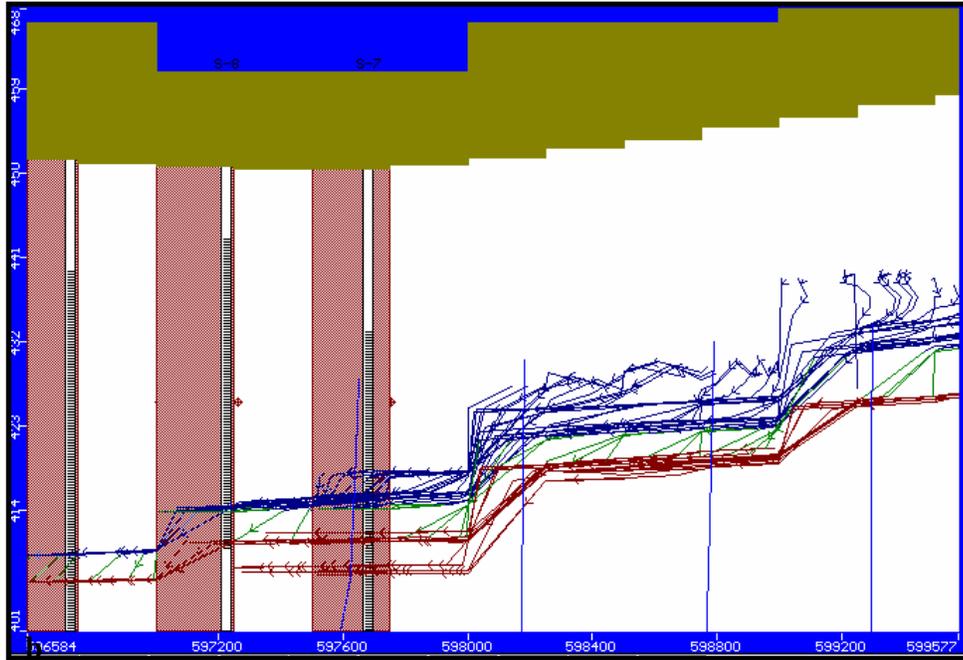


Fig. No.V.11.b. Zona de Captura del Campo de Pozos de Chaguitillo. b-Sección transversal que indica la dirección de flujo (azules-desde arriba, verdes – movimiento horizontal, marrón-movimientos desde abajo)

Para la simulación de los caudales máximos durante el año 2010, con la alternativa de explotación I. Ver Tabla Nos.IV.14 y IV.15 (en IV.6 Producción Actual y Proyectada del Campo de Pozos Para Abastecimiento de Agua Potable a la Ciudad de Matagalpa), no se observaron mayores cambios que los de la época de simulación 2005.

El comportamiento de las entradas y salidas para las tres épocas simuladas no se ve afectada por el aumento de la extracción para el año 2010. La Tabla No.V.10 muestra los cambios producidos en los componentes del balance hídrico con la explotación del campo de pozos de Chaguitillo.

Tabla No.V.10. Resultados del Balance Hídrico del Modelo con la Explotación del Campo

Componente del Balance Hídrico	2000		2005		2010	
	Entrada MMC	Salida MMC	Entrada MMC	Salida MMC	Entrada MMC	Salida MMC
Pozos	0	32.85	0.00	36.55	0.00	37.65
Recarga	32.86	0	32.86	0.00	32.69	0.00
Río	4.59	0.59	5.41	0.42	5.38	0.37
G.H.B	0.49	4.5	1.29	2.59	1.86	1.92

En las condiciones de explotación actual, los cambios hidrogeológicos principales observados, con la puesta en marcha del campo de pozos de Chagüitillo, fueron:

- La zona de captación de estos pozos se extendió hasta la parte norte del acuífero, zona de recarga. Los pozos cercanos al campo de pozos de Chagüitillo, compensan la interferencia de éstos, aumentando la recarga desde el río hacia el acuífero, la que es denominada recarga inducida por bombeo. Otra consecuencia ligada al caudal del río, fue la disminución de la descarga del acuífero en 0.1 MMC, en la zona de descarga, reflejado como salida del río, de nuevo, se interceptan las salidas a través de los pozos de explotación.
- El volumen de agua que sale del acuífero actualmente, a través de la frontera de carga general, disminuiría en 0.8MMC aproximadamente, para el año 2005, y en 1.37 para el año 2010; que minimiza el efecto provocado por la puesta en marcha de pozos de producción.

La explotación del campo de pozos en chagüitillo en sí, no afecta significativamente, comparado con la extracción para el cultivo de arroz, que es un peligro de sobreexplotación del acuífero. Este campo tiene un porcentaje de explotación que representa 10% del total, considerando que su área de captación se reduce a la zona norte del valle.

## VI. HIDRODINAMICA DEL ACUIFERO

El acuífero del valle de Sébaco está formado básicamente por un relleno de naturaleza heterogénea, compuesto de sedimentos de diferente granulometría, como arcilla, limo, arena de fina a gruesa, gravas u bolones. El espesor y distribución espacial de éstas capas, está condicionada por la deposición de los materiales litológicos. Los espesores de hasta 70m, se encuentran al pié de las montañas y en los que se consideran antiguo cursos de los ríos. Fig.IV.8 (en 4.2.5 Superficie Piezométrica)

El acuífero se encuentra entre dos capas limo-arcillosas que le conferían el carácter de semiconfinado hasta 1985; reflejado en el artesianismo de algunos pozos, no presente actualmente, debido a la disminución de los niveles freáticos por debajo de esta capa, presentando entonces un carácter libre.

La heterogeneidad del acuífero, reflejado en la discontinuidad de los estratos, implica particularidades en la hidrodinámica, donde las conductividades hidráulicas presentan un amplio rango, en áreas pequeñas. Fig. No.V.7. Lo anterior también es aplicable a la recarga, ocurriendo especialmente en los linderos norte, este y oeste del valle.

Así mismo, el sistema de flujo, está condicionado así mismo por el espesor y distribución de los materiales acuíferos; esto se refleja en el cambio brusco de gradiente desde las partes altas del valle, calculado en 0.006 y de 0.0008 en la parte media y baja del acuífero.

La hidrodinámica del acuífero, se traduce en volúmenes de agua que circula por el sistema acuífero. El balance hídrico, o volúmenes de agua por componente de balance hídrico, calculado por el modelo matemático, para la época natural y la época actual; se desglosa en la Tabla No.VI.1:

Tabla No.VI.1. Balance Hídrico Calculado por el Programa de Modelo

Componente del Balance Hídrico	1970		2000	
	Entrada (MMC/año)	Salida (MMC/año)	Entrada (MMC/año)	Salida (MMC/año)
Pozos	0	0	0	32.85
Recarga	13.61	0	32.86	0
Río	3.34	8.42	4.59	0.59
G.H.B	0.0344	8.57	0.49	4.5
<b>Total</b>	<b>16.984</b>	<b>16.98</b>	<b>37.95</b>	<b>37.95</b>

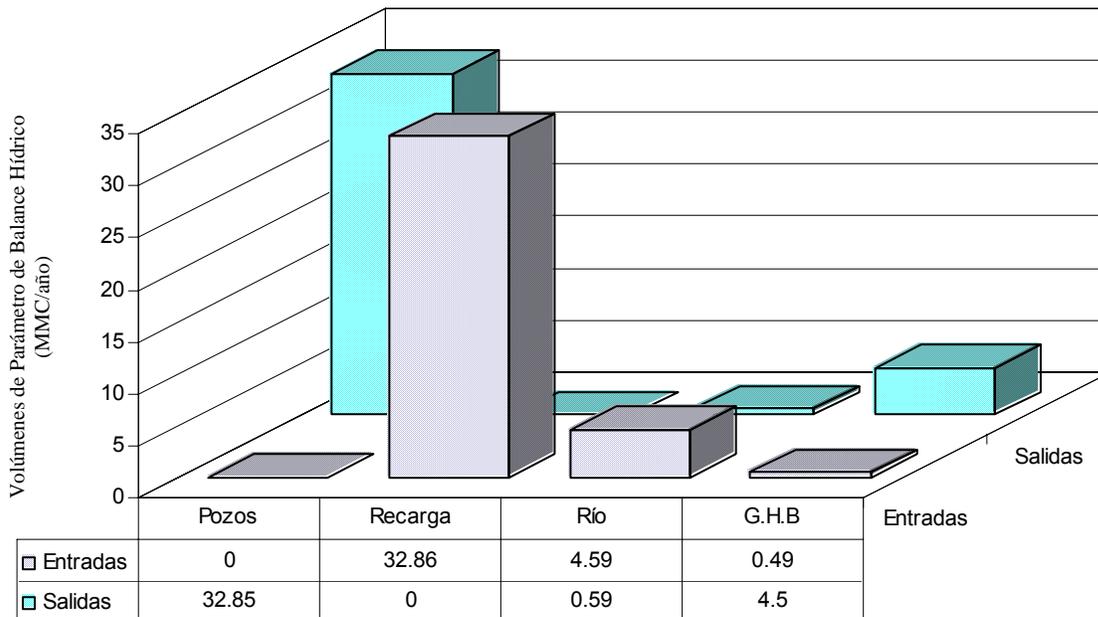


Gráfico No.VI.1 Balance Hídrico Calculado por el Programa de Modelo

El análisis de la Tabla No.VI.1. y el Gráfico No.VI.1, permite concluir lo siguiente:

- La recarga natural del acuífero calculada a partir del modelo matemático es de 13.61MMC/añual, en tanto que la recarga total para el período de explotación 2002 es de 32.86MMM/añual. Lo que da una diferencia de 19.25MMC/añual, proveniente de la recarga de retorno por riego (14.17MMC/añual), de la infiltración directa desde los ríos Viejo y Grande de Matagalpa (4.59MMC/añual);

y la zona del embalse La Virgen y desde la descarga subterránea en Ciudad Darío y la Comarca El Zapote (0.49MMC/año).

- En la zona de descarga en las partes bajas, hacia el embalse La Virgen y Ciudad Darío el caudal saliente es de 5.09MMC anuales, reflejado como salida desde los ríos y salida desde la Frontera G.H.B en la Tabla No.VI.1.
- El Total de la descarga es de 37.95MMC anuales.

Analizando la hidrodinámica del acuífero mediante las entradas y salidas del sistema, tenemos:

La recarga de retorno, indica que la capa superior no es totalmente impermeable y que a través de esta hay infiltración hacia el acuífero, esto mantiene los niveles freáticos actuales. Puede afirmarse que la recarga de retorno por riego y la inducida por bombeo desde los ríos, hace que la disminución de los niveles no sean drásticos.

Es evidente el reciclaje del agua del acuífero en la zona, con lo cual se asevera que durante un lapso de 30 años, desde que fue evaluado el acuífero por Tahal (1977), solamente ha habido un rebajamiento regional en los niveles freáticos de 10m. Este rebajamiento ha dado paso al carácter libre actual del acuífero.

El modelo matemático ha permitido determinar los principales componentes del balance hídrico subterráneo, para la identificación de la disponibilidad del volumen aprovechable de agua en el acuífero

Del análisis anterior se desprende que las principales entradas al acuífero provienen de:

- La recarga directa por la precipitación en el valle; la que se ha mantenido estable, debido a que las condiciones del suelo en las zonas de recarga y precipitación pluvial, no han cambiado. La recarga de retorno por riego contribuye significativamente a la recarga total del acuífero y a mantener los niveles actuales.
- La recarga a través de los ríos mantenida todo el año

- La recarga lateral como flujo subsuperficial desde las montañas que rodean al valle, podría haber variado significativamente debido, a la deforestación sufrida con la consecuente alteración de la capa agrícola de suelo.
- La infiltración en la parte baja, desde el Embalse La Virgen hacia el acuífero.

Las principales vías de descarga son:

- La extracción por pozos
- La Descarga hacia los ríos por el sur
- La Descarga Subterránea por el sur del acuífero.

Aunque los niveles de agua en el acuífero se han disminuido en relación a épocas anteriores, el aporte del agua de riego hacia el acuífero, representa una recarga significativa.

Con este hecho, se asume una ventaja y desventaja hacia, para la utilización del agua subterránea, debido a los agroquímicos que se utilizan en el sector.

## VII. DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO SUBTERRANEO

La recarga natural del acuífero es de 13.61MMC, identificada en la etapa de calibración natural del acuífero, para el año 1970; la recarga actual tomando en cuenta el retorno por riego es de 32.86 MMC anuales.

La extracción actual total del acuífero, a partir de aproximadamente 150 pozos bombeados irregularmente, es de 32.85 MMC anuales.

La descarga de los campos de pozos de Chagüitillo es de aproximadamente 3.7MMC, la que sumada a la extracción actual suman un total de 36.55, comparada con la recarga actual, se necesitan 3.69MMC para mantener el estado de equilibrio; por esto la explotación de estos pozos, provoca el rebajamiento de los niveles actuales para mantener el acuífero en estado de equilibrio o estado estacionario.

El total de extracción del campo de pozos de Chagüitillo, como puede verse en la Tabla IV.12, para el año 2005 será de 3.70MMC y 4.79 para el año 2010. Considerando lo anterior, el déficit de agua para el campo de pozos de Chagüitillo será de 3.2MMC para el año 2005 y de 4.29MMC para el año 2010. Esto se compensa con el rebajamiento de los niveles, la entrada de agua desde los ríos y la disminución de la descarga subterránea hacia el sur del valle, a través de la Frontera de Carga General.

Las reservas del acuífero en un área aproximada de 100Km<sup>2</sup>, debido a la geometría irregular del acuífero en profundidad, un espesor promedio de las capas permeables según los registros litológicos de 38.75m y una porosidad de 0.25, se calcularon en 1000 MMC. Si se acepta un rebajamiento de 15 m. se podría extraer 350MMC, cinco veces la extracción actual, lo que se recomienda realizarlo de manera intensiva o un espaciamiento mayor entre los pozos, en la actualidad irregularmente se extraen 72MMC.

Se ha identificado que la descarga de los pozos como la vía de explotación del agua subterránea, ha sobrepasado la recarga directa por precipitación, o sea que actualmente se extrae parte de las reservas del acuífero; complementada con agua de los ríos y de la infiltración por exceso de riego.

Se simuló para este efecto la explotación actual, la entrada en explotación del campo de pozos y la recarga máxima calculada. Los resultados fueron satisfactorios. El gráfico VII.1, muestra los resultados de esta simulación.

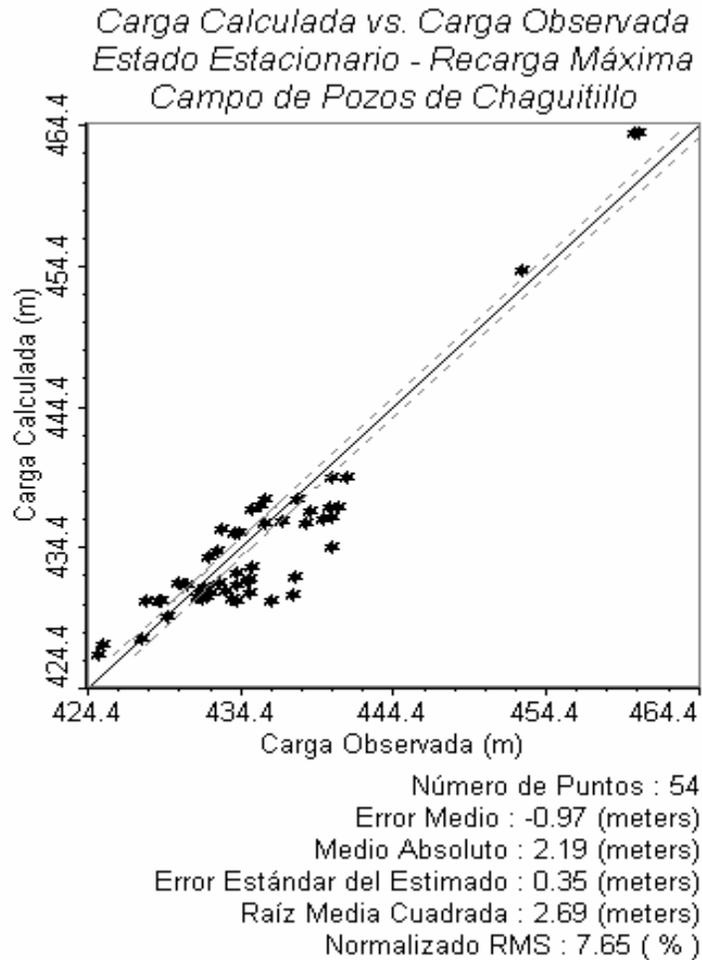


Gráfico No.VII.1. Resultados de la Simulación Campo de Pozos de Chaguitillo y Recarga máxima.

A partir de esta simulación se explica que el principal problema del acuífero Valle de Sébaco, es el volumen de recarga natural, la que podría incrementarse con algunas pequeñas obras que faciliten la infiltración del agua de lluvia, tales como embalses o diques. Estos impedirían el escurrimiento hacia los ríos y mantendría los niveles del acuífero, lo que al mismo tiempo se traduciría en un aprovechamiento de los recursos hídricos del área.

## VIII. LIMITACIONES DEL MODELO

### - Datos Utilizados

La reproducción del sistema acuífero del Valle de Sébaco y las predicciones realizadas a través del programa MODFLOW, ha sido posible por algunas simplificaciones y supuestos realizados y desglosados como sigue:

- La capa acuífera ha sido definida como una sola, debido al desconocimiento de la colocación de la rejilla de la mayoría de los pozos y a la reinterpretación realizada de los perfiles litológicos. Sin embargo, se han tomado los valores promedios de todas los parámetros hidráulicos, lo que aumenta la confiabilidad del modelo; dado que en las condiciones reales, la rejilla es colocada en todos los estratos permeables. Es decir que los niveles piezométricos y las conductividades hidráulicas representan los valores promedios de la capa acuífera.
- La conductividad hidráulica vertical ha sido tomada de datos teóricos como 10 veces menor que la conductividad hidráulica vertical. Este es también, un valor promedio evaluado en acuíferos similares al valle de Sébaco.
- En la zona donde no se han realizado pruebas de bombeo se trabajó con valores interpolados o extrapolados de conductividad hidráulica, de acuerdo a pruebas realizadas en zonas similares del valle o datos teóricos, según el tipo de medio permeable.
- El basamento hidrogeológico ha sido deducido a partir de la geofísica realizada en el valle y a través de un pozo de exploración, en el centro del valle y otros en la periferia, lo que le confiere cierto grado de incertidumbre para la zona central.

### **- Programa Modflow**

Una limitación importante en este programa es que los ríos ocupan siempre el espesor total de la primera capa, por lo que puede ser menor o mayor que la lámina de agua real, de acuerdo al espesor de la capa por donde circulan.

La malla de diferencias finitas no permite la reproducción de capas que se interdigitan y desaparecen. La entrada de datos se realiza para cada celda, lo que podría no reflejar puntualmente los parámetros del acuífero.

El modelo calcula la carga hidráulica para una celda en particular, lo que podría no ser la aproximación de la carga hidráulica en el pozo. Los parámetros hidráulicos se extienden por todo el tamaño de la celda de 250\*250m.

El modelo fue calibrado a escala regional, para un estudio a detalle de una zona en particular se necesita la redefinición de algunas variables del modelo.

## **IX. CONSECUENCIAS DE LA EXPLOTACION DEL ACUIFERO**

Las consecuencias de la explotación no planificada del acuífero del Valle de Sébaco deben ser evaluadas desde diferentes perspectivas; ya que no implica únicamente el rebajamiento de los niveles, otras consecuencias ligadas a esto, se derivan:

- La subsidencia del nivel del terreno, este fenómeno geotécnico, debe ser evaluada, ya que al perder presión el acuífero al bajar la carga de lámina de agua, esta cede a los efectos de la gravedad con el consecuente hundimiento del terreno. Las mediciones geodésicas pueden dar respuestas a estas interrogantes.
- El hundimiento del terreno, trae como consecuencia que la porosidad del acuífero disminuya, lo que conlleva a la disminución de la permeabilidad del mismo, como efecto de aceleración de la diagénesis o formación de rocas consolidadas, al disminuir la presión ejercida por el agua contenida en los poros que es expulsada a la superficie el esqueleto mineral se comprime dando lugar a la disminución de los espacios vacíos.
- Al bajar la permeabilidad del acuífero, también pierde capacidad de almacenamiento y aún cuando se tomen las medidas necesarias para detener la sobreexplotación, no sería posible aplicar recarga artificial del acuífero, a partir de los datos de porosidad conocidos, hasta no haber evaluado el grado de compactación sufrido.

Las aguas utilizadas para riego se distribuyen de la siguiente manera:

- Agua utilizada para las plantas
  - Agua evaporada
  - Agua infiltrada nuevamente al acuífero
- El agua infiltrada nuevamente al acuífero contiene agroquímicos o sus productos de degradación que son utilizados para los cultivos de la zona; en el caso del valle de Sébaco, se reportaron concentraciones que sobrepasan la norma de potabilidad. (González R., 2002).

- El cultivo de arroz, que es la principal actividad agrícola del área, tal como se viene desarrollando actualmente; está causando un daño ecológico que podría resumirse básicamente en: gasto excesivo de agua, que conlleva a la disminución de la superficie freática, contaminación del acuífero, salinización de suelos, etc. Sin embargo existen prácticas de cultivo de arroz, con las que se puede lograr el balance ecológico deseado. Ver Anexo C.
- Las zonas de captura de los pozos, debido a la elevada densidad de los pozos en un la parte central del valle en particular y la explotación de los mismos, se extiende hacia la capa superior, especialmente en las zonas bajas. Esto provoca infiltración hacia el acuífero, con la consecuente lixiviación de los productos agroquímicos acarreados en las aguas superficiales.

## **X. PERFIL DEL PLAN DE GESTION DEL ACUIFERO DEL SEBACO**

### **X.1 Introducción**

Las condiciones de desarrollo socioeconómico actual del país, el grado de explotación actual del acuífero del Valle de Sébaco y el enfoque integral del manejo de agua subterránea, requieren de una adecuada gestión del recurso. Para esto, es necesaria la formulación de plan de gestión del recurso hídrico, en el enfoque de cuenca de captación.

La complejidad del sistema hidrogeológicos y de los procesos que determinan el impacto de las actividades humanas sobre las aguas, la toma de medidas y el establecimiento de una legislación que permitan mejores prácticas de manejo, deben estar basadas en un conocimiento detallado de los procesos hidrogeológicos, (Vargas J., 2002).

El modelo matemático del acuífero Valle de Sébaco, ha permitido reproducir la ocurrencia, distribución y dinámica del agua subterránea a escala regional.

Se ha identificado las zonas de alimentación o recarga, determinando la evolución del acuífero a lo largo de todo su período de explotación. Además se ha evaluado la respuesta en la implementación del campo de pozos para abastecimiento de Matagalpa para un período de 5 y 10 años; se determinó que con un 25% de incremento en la recarga y bajo las condiciones de explotación actual, la afectación al acuífero sería mínima. Gráfico No.VII.1.

Al mismo tiempo se ha identificado de manera general la deforestación que ha sufrido la cuenca de captación superficial. Capítulo IV, Sección IV.I. La ausencia de vegetación en las montañas circundantes, provoca una menor recarga al acuífero, debido principalmente a la pérdida de suelo por erosión hídrica. La ausencia de suelo aumenta escorrentía superficial; esto disminuye el tiempo de retención del agua que puede recargar al acuífero de manera subsuperficial.

Los resultados de este trabajo, permiten conceptualizar los lineamientos de un plan de gestión del recurso hídrico subterráneo, enfocado en primer lugar a los recursos que afectan directamente la infiltración hacia el acuífero, como son el suelo y la

vegetación; así mismo, valorar todos los usos del agua y los programas de desarrollo que utilicen el recurso hídrico, apoyando la gestión integrada de la cuenca.

En este estudio, se proponen planes de desarrollo socioeconómicos que pueden ser planificados, desarrollados y ejecutados por las instancias correspondientes.

## **X.2 Objetivos**

Los lineamientos generales del plan de gestión de este estudio, pretende delimitar las acciones a seguir, para la utilización del recurso en armonía con el ambiente y el desarrollo socioeconómico del país; es decir su conservación y en algunos casos recuperación, sin detrimento del uso del agua. Estos lineamientos pueden ser utilizados por los entes encargados del manejo y la planificación del recurso. (MAGFOR, MARENA, ENACAL, etc.), así como también inversionistas y cualquier usuario del agua. De esta forma se persigue en este capítulo:

1. Proponer programas de desarrollo hídrico para establecer una adecuada planificación de la explotación del recurso subterráneo en el valle.
2. Formular los usos del agua subterránea, interrelacionando las problemática ambiental y poblacional.
3. Valorar la explotación integral de agua subterráneo, bajo criterios de sostenibilidad.

## **X.3 Diversidad Socioeconómica del Valle**

El Valle de Sébaco y su cuenca de captación superficial, engloban una diversidad paisajística y una riqueza de recursos naturales, los que a través del análisis realizado en este estudio; se puede concluir que actualmente sufren un grado de degradación media, la deforestación de la región central es algo que se ha acelerado en los últimos 10 años; por lo que se considera que aún es posible implementar planes de recuperación de los recursos naturales en general, antes que la pérdida del suelo sea total. Actualmente existen algunos programas de INAFOR, en los que se ha sembrado pinares en algunas montañas, esto indica que aún es posible la recuperación de los bosques.

El Valle de Sébaco como punto de confluencia de los Departamentos de Estelí, Madriz, Nueva Segovia, Matagalpa y Jinotega, representa un potencial comercial, en lo que se refiere a la producción agrícola.

El valle en sí es cruzado por los dos ríos Viejo y Grande, en los que se podrían construir obras de captación, para riego y energía Hidroeléctrica.

Este potencial, puede aumentarse si se recupera la componente forestal de la cuenca del valle, así como también la implementación de pequeñas obras de captación de agua superficial en las zonas de recarga; esto acarrearía más producción de agua y por ende mayores perspectivas de desarrollo socioeconómico.

La Organización Mundial para la Migración junto con la Alcaldía de Sébaco y Ciudad Darío elaboraron el “Plan Integral de Desarrollo Municipal” para estos dos municipios. En este trabajo, se realizó el diagnóstico de los recursos naturales en la subcomponente denominada “Sistema de Recursos Naturales e Impacto ambiental”, a partir del cual se presenta el ordenamiento propuesto para la recuperación de los recursos naturales. La Fig.No.X.1, presenta un esquema general de manejo de la cuenca hidrológica del acuífero del Valle de Sébaco, con el objetivo de recuperación del entorno ambiental, enfocado a la conservación del recurso hídrico subterráneo. A partir de ésta debe elaborarse a detalle, las actividades para cada zona en particular dependiendo de las condiciones actuales del suelo.

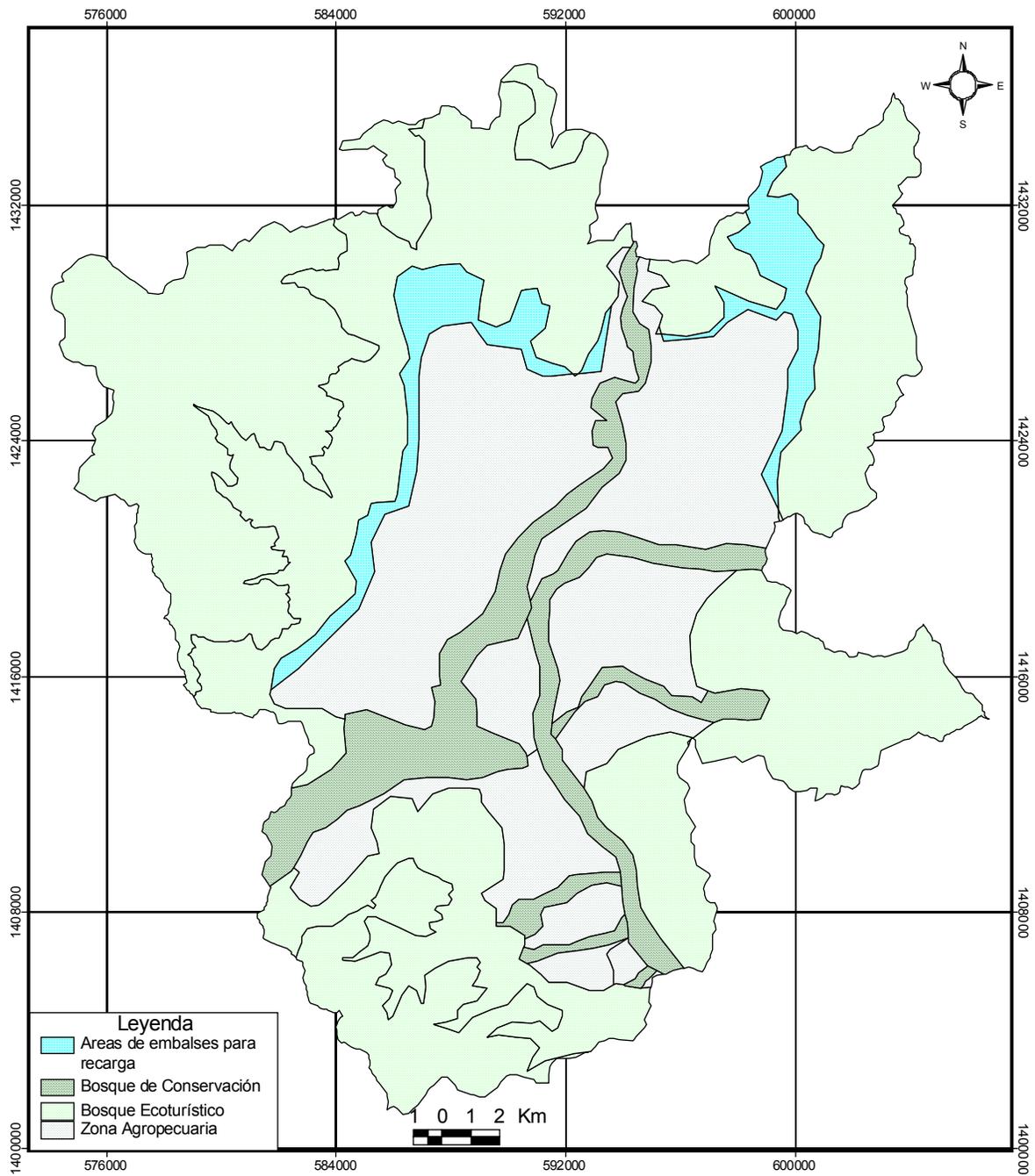


Fig. No.X.1.Esquema general de Manejo de la Cuenca Hidrológica del Acuífero del Valle de

#### **X.4 Lineamientos del Plan Hídrico del Valle**

Un plan de gestión del recurso hídrico debe contemplar, las condiciones de ocurrencia y dinámica de agua, así como los diferentes usos que se le da al recurso, en los diferentes tópicos de desarrollo:

1. Desarrollo Agropecuario
2. Desarrollo de Abastecimiento Potable
3. Desarrollo Agroindustrial
4. Desarrollo Ecoturístico
5. Desarrollo Comercial

#### **X.5 Generación de Proyectos en el Ambito de Sostenibilidad Hídrica del Valle**

##### **– Desarrollo Agropecuario**

El potencial agrícola del Valle de Sébaco, ha sido valorado por el gobierno central de forma general y está contemplado, como zona de desarrollo agrícola, en sus planes para los próximos años.

Se ha evaluado en este trabajo que los volúmenes de extracción de agua para uso agropecuario, son los que representan la descarga principal del acuífero, lo que ha venido disminuyendo las reservas de éste; por otro lado se ha evaluado también la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en las condiciones actuales, lo que ha llevado a la conclusión que no pueden construirse más obras de captación, sino que deben revisarse las cantidades de agua utilizada hasta ahora.

Si se quiere explotar el recurso suelo y agua en armonía con el ambiente, con miras a un manejo sostenible de éstos, las prácticas de cultivo actual, que conllevan al agotamiento de las reservas del acuífero, ya reflejadas en el modelo matemático ejecutado, deben modernizarse. Un buen resultado se obtuvo las prácticas implementadas en Brasil y Madagascar. Anexo C

Para la rotación de cultivos y para alternativas en el uso del suelo, debe realizarse un estudio del estado de degradación de los suelos y la aptitud actual para cultivos.

Se observa, sobre todo en la zona de descarga del valle la salinización que están sufriendo los suelos.

Otra punto a cambiar es el uso no controlado de agroquímicos, para disminuir la contaminación ya reportada en el estudio inédito de Gonzáles R., 2002

El potencial del suelo del valle, según el estudio de Ordenamiento Territorial de los departamentos de Jinotega y Matagalpa, (INETER-NORAD, 1980), tiene también vocación ganadera, por lo que se deben evaluar planes de ganadería intensiva.

La construcción de pequeños embalses naturales, en las zonas identificadas como de recarga durante la elaboración del modelo conceptual, pueden ser utilizados con dos fines: recarga al acuífero y riego.

Estos embalses deben construirse luego de una evaluación del grado de compactación sufrido por el acuífero debido a la pérdida de presión provocada por el rebajamiento de los niveles, con la posterior compactación del terreno.

El Estudio de Tahal Consulting, 1977 propone la construcción de un embalse sobre el río Grande de Matagalpa, podría evaluarse esta alternativa para compensar el déficit actual.

#### – **Desarrollo de Abastecimiento Potable**

Aunque existe un estudio no publicado del impacto de agroquímicos en el acuífero se necesita realizar el estudio a detalle, es decir evaluación de todos los parámetros físico – químicos, de agroquímicos y metales pesados a diferentes profundidades y una red de muestreo, de densidad tal, que permita conocer el grado de contaminación de éste para la elaboración del plan de remediación.

Las pequeñas comunidades se abastecen de pozos perforados de poca profundidad, y en las épocas de máxima explotación de parte de los pozos para arroz, algunos de ellos se secan y producen agua de mezcla, provocada por el bombeo, por ello es necesario la ejecución de pozos profundos en estas comunidades.

La red de abastecimiento potable de la ciudad de Sébaco ha estado en funcionamiento por aproximadamente 30 años, lo que puede estar provocando

pérdidas por tubería, por ello la renovación de redes de abastecimiento debe también contemplarse en los planes de desarrollo.

Las aguas subterráneas del valle de Sébaco, están contaminadas, por lo que se requiere elaborar planes de tratamiento de agua potable, los que deben enfocarse en el tipo de contaminación encontrado.

En lo concerniente al campo de pozos de abastecimiento a la ciudad de Matagalpa, éste municipio debe compensar la salida de estos volúmenes involucrándose en cualquiera de los planes de uso y gestión del recurso.

#### – **Desarrollo Agroindustrial**

El desarrollo socioeconómico contempla los planes agroindustriales, actualmente en el valle existe la empresa maquiladora de Sébaco, para el trabajo armónico de la industria en el ambiente, se necesita la implementación de tecnología limpia, que permita un gasto menor de agua y la posibilidad del reuso de la misma.

Se podrían establecer bajo las mismas condiciones que la industria textilera, industrias alimenticias.

#### – **Desarrollo Ecoturístico**

El potencial ecoturístico en la zona, lo presentan las montañas y los ríos, donde puede realizarse turismo de montaña y navegación turística.

Para el turismo de montaña se requiere la recuperación de la vegetación, mediante planes de reforestación, con especies adecuadas al tipo de suelo de la región, la que consecuentemente podría traducirse en la recuperación de la fauna silvestre, según su grado de extinción.

La construcción de nuevas represas podrían aumentar el caudal de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa, por lo que pueden aumentar su capacidad de navegación, como actividad recreativa.

## – Desarrollo Comercial

Actualmente el comercio local, está limitado a la venta de hortalizas en el empalme de Sébaco.

La organización de este mercado y la construcción de nuevos mercados, que puedan comercializar los productos de la región y los departamentos del norte, debe ser incluido en un ordenamiento local del territorio.

La construcción de la presa propuesta por Tahal, 1977, puede, igual que la Presa de Apanás servir para dos fines, utilizar menor cantidad del agua del acuífero, alternando el uso de agua superficial y subterránea en la agricultura, para detener el ritmo rebajamiento de los niveles del acuífero y para los fines propuestos: la generación de energía eléctrica que puede ser distribuida en todo el país.

### X.6 Involucramiento Institucional de la Gestión del Recurso Hídrico

La coordinación interinstitucional es de vital importancia para la puesta en marcha del plan de gestión de recursos hídricos.

Cada ente debe incluir el acuífero del Valle de Sébaco como una prioridad en los programas de trabajo:

PROGRAMA	INSTITUCIONES – Participantes
Desarrollo Agropecuario	MAGFOR, Alcaldías, Productores, Comunidad Indígena.
Desarrollo de Abastecimiento Potable	INAA, ENACAL (AYAMAT), Alcaldías
Desarrollo Agroindustrial	MIFIC, MAGFOR, Alcaldías
Desarrollo Ecoturístico	MARENA, INTUR, Alcaldías
Desarrollo Comercial	MAGFOR, Alcaldías, INE, Unión FENOSA

## X.7 Proyecciones de la Gestión del Plan a Corto, Mediano y Largo Plazo

PROGRAMA	PLAZO		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
Desarrollo Agropecuario	Ejecución de los Proyectos existentes del Gobierno Central.  Evaluación del grado de degradación de los suelos.	Implementación de Técnicas Modernas de Cultivo del Arroz y Hortalizas	Rotación de Cultivos y Puesta en marcha de ganadería intensiva
Desarrollo de Abastecimiento Potable	Perforación de Pozos Profundos en las pequeñas comunidades.  Tratamiento de Agua Potable.	Renovación de redes de abastecimiento y Construcción de Plantas de Tratamiento Potable y Residual	Plantas de Tratamiento Potable y Residual  Reciclaje de Agua
Desarrollo Agroindustrial	Mantenimiento de la Zona Franca.	Implementación de Tecnología Limpia	Establecimientos de nuevas industrias alimenticias
Desarrollo Ecoturístico	Proyectos de Reforestación	Turismo de Montaña	Navegación Turística sobre el Río Viejo
Desarrollo Comercial	Organización del mercado actual.	Desarrollo de nuevos mercados incluyendo la venta de agua	Mejoramiento de la Generación Hidroeléctrica.  Venta de Servicios Ambientales

Todos estos planes deben estar englobados en un Plan de Acción, único que refleje todos los usos del agua y todas las medidas de conservación y recuperación del recurso hídrico.

## X.8 Perspectivas de Desarrollo Integral del Recurso y Soluciones

El acuífero del Valle de Sébaco, representa un potencial hídrico importante para el desarrollo socioeconómico del país.

Actualmente está sufriendo un lento pero progresivo deterioro de sus recursos naturales.

Si se implementan las medidas necesarias de conservación y recuperación del recurso, se tiene entonces una perspectiva de desarrollo integral en la que todos los componentes económicos y sociales pueden conjugarse con la conservación y recuperación del medio ambiente del entorno.

### **X.9 Manejo Integral y Aplicación de Políticas del Recurso Hídrico**

La complejidad de la situación geográfica del acuífero, compartido entre tres municipios, le confiere una particularidad de gestión, en la que la gobernabilidad sería un aspecto estratégico a desarrollar.

La revisión de la ley de municipios, su competencia, conjugado con las políticas de recursos hídricos y ambientales a nivel nacional, podría conllevar al manejo integral del recurso hídrico en la región, al mismo tiempo la satisfacción de todas las partes involucradas en el uso y manejo del acuífero del Valle de Sébaco.

Las autoridades de los municipios de Sébaco, San Isidro, Darío y La Trinidad, deben unir esfuerzos en la elaboración del Plan de Gestión para el acuífero Valle de Sébaco.

El ordenamiento local del territorio y un plan de acción de recursos hídricos particular para el valle de Sébaco, debe estar contemplado en todos los planes de desarrollo que en éste se realicen.

## **XI. CONCLUSIONES**

1. La evaluación de las condiciones ambientales de la cuenca hidrológica del acuífero del Valle de Sébaco, ha permitido identificar el nivel de deforestación de casi toda del área y la consecuente degradación del suelo .
2. Las condiciones climáticas de la región a través de los años 1952 a 2002, en promedio no han variado, la precipitación se ha mantenido en los rangos de 800-900mm, por lo tanto, este factor no es limitante para la recarga directa por precipitación, sino que la afectación se debe a la deforestación de las montañas circundantes, que provoca mayor escorrentía superficial y menor infiltración al acuífero.
3. Las zonas de recarga definidas a partir de los datos de Tritio, coinciden con las determinadas a partir del balance hídrico de suelos, lo que define claramente las zonas preferenciales de infiltración, localizadas en los bordes superior, este y oeste del valle; además del lecho de los ríos Viejo y Grande de Matagalpa.
4. El uso del agua subterránea es especialmente para el cultivo de arroz, donde no existe control sobre los volúmenes de riego, lo que provoca mayor efecto sobre el acuífero, aún que la explotación actual se mantenga igual a la época de 1980-1990.
5. Con el objetivo de evaluar la evolución del acuífero a lo largo de las épocas de explotación y su comportamiento futuro se ha utilizado un modelo numérico. El programa de modelo aplicado es el Visual Modflow; con este se ha simulado, en tres dimensiones, las condiciones del acuífero en estado estacionario. Se definieron celdas de 250m x 250m en el plano horizontal y tres unidades estratigráficas en vertical. Para la época natural se simuló el año 1970; las épocas de explotación de 1980-1990 y 2000, fueron utilizadas para la verificación del modelo. Se realizó la simulación para la predicción de los años 2005 y 2010. El error promedio de calibración logrado oscila entre 5 y 9%.

6. La superficie piezométrica del año 2002, muestra que ha habido un rebajamiento regional en los niveles, de 13m en la zona alta y de 5m en la zona baja, contrario a las predicciones realizadas por el modelo de Tahal en 1977, donde se predijo un rebajamiento de 30m en la zona alta y 10 en la zona baja. Esto demuestra que a lo largo de 40 años no ha habido efectos significativos sobre el acuífero, se refleja un rebajamiento de 0.3m anuales.
7. El modelo matemático, ha permitido identificar la componente de recarga lateral y la recarga de retorno por riego (extraída del acuífero y de los ríos Viejo y Grande), que aumenta la recarga natural de 13 a 32MMC, de los cuales el 90% proviene de la recarga de retorno por riego, como parámetro que ha contribuido significativamente a mantener los niveles freáticos actuales.
8. La superficie piezométrica del año 2002, reflejada en la Fig.IV.14, muestra que hay una descarga local, desde el Sector de Las Mangas hacia el embalse La Virgen. En esta zona, es donde se ha reportado problemas de hidroarsenismo, que demuestra la dinámica del agua subterránea con alimentación desde las montañas que rodean el valle.
9. La condición de aportador del río Viejo, hacia el acuífero, se ve reflejada en el aumento de volúmenes de agua infiltrada a través de cada época de 3.34MMC en 1970 a 4.59MMC en 2000, y con la explotación del campo de pozos de Chagüitillo, donde aumenta a 5.41MMC. Esta situación, por una parte, es una condición de ventaja del acuífero, al no producirse una reducción drástica de los niveles piezométricos. Por otro lado, desventaja, debido a que las aguas de retorno, acarrearán agroquímicos que contaminan el acuífero. Esto ha sido determinado por el estudio de González. R. 2002.
10. El estado de equilibrio en el acuífero, con la explotación del campo de pozos de Chagüitillo para el año 2005, se mantiene, produciendo un rebajamiento local promedio aproximado 5m y para el año 2010 de 7m, en los niveles actuales de la zona entre la carretera Sébaco-San Isidro y las montañas al norte del Campo de Pozos. Esto justifica que la recarga actual es satisfactoria para la condición actual de explotación.

11. La simulación del campo de pozos con recarga máxima de 250 y 125mm por zona de recarga (+25% de la recarga de calibración), refleja que, si se implementan algunas medidas de protección y recuperación del recurso hídrico, tales como construcción de embalses y reforestación como una medida a largo plazo, es posible detener la disminución de los niveles y hasta aumentar éstos con el tiempo.
12. Para minimizar el rebajamiento del acuífero se debe mantener la explotación actual de 72MMC, sin embargo valorando los planes de reactivación del Ministerio Agropecuario y Forestal, se podría explotar el acuífero en aproximadamente cinco veces la extracción de este momento, sin afectar significativamente las reservas; lo que dependería del tipo de cultivo o de una explotación igual a la actual durante 10 años más, para un rebajamiento total de 15m bajo los niveles actuales.
13. El modelo matemático, representa un trabajo de simulación automatizada del sistema acuífero, en el que se ha definido el modelo conceptual y numérico; donde los datos están organizados de forma tal, que se puede alimentar el modelo con información nueva, aumentando de este modo la confiabilidad y grado de precisión de las predicciones realizadas.

## **XII. RECOMENDACIONES**

1. El modelo matemático debe ejecutarse en estado no estacionario, es decir simular el comportamiento de la época seca y lluviosa, a fin de que se refleje, de forma dinámica, los volúmenes disponibles para cada época, ya que el acuífero es explotado casi todo el año.
2. Deben evaluarse las técnicas agrícolas actuales, enfocado a la disminución del rebajamiento de los niveles y la contaminación por agroquímicos: Principalmente la explotación del acuífero debe realizarse de forma extensiva y no intensiva como se ha venido practicando.
3. Es necesario un plan de reforestación de la cuenca de captación superficial, con especies adecuadas, al tipo de suelo de la región, y en la que se pueda combinar las actividades agropecuarias, que permitan el autosostenimiento de las familias, para de esta manera aumentar el volumen de recarga directa por precipitación.
4. Para la conservación del acuífero, deben implementarse medidas de recuperación del recurso forestal y suelo, entre los que podemos mencionar: cambio en las técnicas del cultivo del arroz, construcción de obras de captación de agua superficial en las zonas identificadas como de recarga.
5. Un ordenamiento local del territorio, enfocado al potencial del área y que combine las actividades socioeconómicas con la conservación y recuperación del recurso, debe ser planificado en conjunto con las autoridades reguladoras del recurso, los entes municipales, la comunidad indígena y todos los usuarios del agua. Sobre este particular, se debe retomar el “Plan Integral de Desarrollo Municipal”. OIM-HUD-Alcaldías de Sébaco y Darío, 2000.
6. Se requiere la elaboración y ejecución de Plan de Gestión Integral de los Recursos Hídricos. En este trabajo se proponen los lineamientos generales del plan, el que debe ser trabajado a detalle por cada una de las instituciones en el ámbito competente.

### **XIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

**Anderson M.P. and Woessner WW, 1992.** *Applied Groundwater Modeling.* Academic Press, Inc. San Diego, California.

**Bethune, D.N., 1991.** *Field and Modeling Studies of Groundwater Contamination of Laguna Asososca.* Tesis. University of Waterloo, Ontario Canadá.

**Cruz, Oscar. 1996.** *Modelaje del Acuífero Managua y su Rendimiento Sostenible.* Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

**Custodio E. y Llamas M., 1996.** *Hidrología Subterránea.* Tomo I y II. Ediciones Omega, Barcelona. España.

**Domenico, P.A. y Schwartz, F.W. 1997.** *Physical and Chemical Hydrogeology.* Second Edition, Jhon Wiley & Sons, Inc. N.Y. U.S.A.

**Fetter C.W. 1988.** *Applied Hydrogeology.* Third Edition, Prentice may, Englewood Cliffs, NJ.

**Freeze A. and Cherry J., 1979.** *Groundwater,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. . U.S.A.

**Glasunov, G., Chochia, N., Cpassky, N.,** *Osnove geomorfologuía y geologuía antropoguena.* Rotaprint, Leningrado.

**INETER, NORAD, 1997.** *Plan de Ordenamiento Territorial de los departamentos de Jinotega y Matagalpa.* Managua, Nicaragua.

**INETER, Dirección de Aguas Subterráneas, 1984.** *EL Agua Subterránea en el Área del Proyecto Hortícola del Valle de Sébaco.* Managua, Nicaragua.

**INETER, MAGFOR, 2001.** *Estudios Hidrológicos e Hidrogeológicos en la Región del Pacífico de Nicaragua. Región Chinandega-León-Nagarote.* Informe Ejecutivo. Managua, Nicaragua.

**INETER, Dirección de Recursos Hídricos, Dirección de Meteorología.** *Base de datos Hidrogeológicos, Hidrológicos y Meteorológicos.* Managua.

**Kiriujin, B.A., Korotkov, A.Y., Pavlov, A.N.,1988.** *Obshaya Guidrogeologuia*.1988, Niedra, Leningrado.

**McCuen, H. R., 1982.** *A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods*. Prentice Hall, INC. Englewood Cliffs, N.J. U.S.A.

**OIM-HUD-Alcaldías de Ciudad Darío y Sébaco. 2000.** *Plan Integral de Desarrollo Municipal*. Managua, Nicaragua.

**Piura L.P., 2000.** *Introducción a la Metodología de la Investigación Científica*. Cuarta Edición. Managua, Publicación de la Escuela de Salud Pública de Nicaragua.

**Plata, A.,1988.** *Hidrología Isotópica del Acuífero Aluvial del Valle de Sébaco*. Managua, Nicaragua.

**Schosinsky G. y Losilla M. 1999.** “*Modelo Analítico para Determinar la Infiltración con Base en la Lluvia Mensual*”. *Revista Geológica de América Central*, 23: 43-55,2000.

**Tahal Consulting Engineers Ltd. Tel Aviv, 1997.** *Proyecto de Desarrollo Agroindustrial Valle de Sébaco*. Managua, Nicaragua.

**Tahal Consulting Engineers Ltd. Tel Aviv, 1997.** *Estudio Hidrológico del Valle de Sébaco*. Managua, Nicaragua.

**Vargas J., 2002.** *Manejo Integrado de Aguas Subterráneas: Un reto para el futuro*. EUNED, San José Costa Rica.

**WHI. MODFLOW Packages. Reference Manual. The official Documentation for MODFLOW Add-on Packages. 1993.** Waterloo Hidrogeologic Software. Waterloo, Ontario, Canadá.

# **ANEXO A**

Tabla No.A.1. Pozos con registros litológicos utilizados en la caracterización del Acuífero

Codigo	Coordenadas	
	Este	Norte
PP-1	597300	1421100
PP-3	596450	1421600
PP-7	591550	1425050
PP-8	588400	1427300
PP-10	587550	1428600
PP-11	587600	1428500
PP-16	596600	1420450
PP-23	590900	1425650
PP-24	598500	1422640
PP-25	599800	1424750
PP-26	599660	1424900
PP-30	599800	1430300
PP-31	599350	1430160
PP-35	591100	1424100
PP-37	591950	1424250
PP-38	592750	1423080
PP-39	592350	1422950
PP-43	594450	1419550
PP-44	594100	1420400
PP-45	593950	1420830
PP-46	595550	1419200
PP-48	589950	1425900
PP-51	595300	1421100
PP-55	599150	1424700
PP-57	599100	1425600
PP-58	597100	1425800
PP-59	596550	1425850
PP-61	600150	1429450
PP-62	593500	1422020
PP-63	595800	1422290
PP-67	594850	1419150
PP-68	590100	1419650
PP-69	599050	1423950
PP-70	595300	1421100
PP-72	590600	1422900
PP-74	588600	1426150
PP-79	596800	1422600
PP-80	596680	1423700
PP-81	596350	1423250
PP-82	593450	1426200
PP-83	594300	1426750
PP-87	594900	1426400
PP-88	593950	1425250

Codigo	Coordenadas	
	Este	Norte
PP-97	592100	1421960
PP-98	591900	1421350
PP-99	590650	1421950
PP-102	597650	1421350
PP-112	589300	1422150
PP-117	589800	1427030
PP-118	594300	1420510
PP-132	599450	1430500
PP-133	590600	1422150
PP-134	596000	1421750
PP-135	597900	1422500
PP-137	596100	1425000
PP-138	595500	1425700
PP-139	599300	1424250
PP-144	598700	1420150
PP-150	599000	1423600
PP-152	594850	1421300
PP-153	592550	1419850
PP-154	588550	1422350
PP-156	595850	1426100
PP-157	597700	1420900
PP-158	592550	1422700
PP-160	596000	1422100
PP-161	597100	1422600
PP-7D	592450	1415400
PP-8D	594100	1417350
PP-11D	585650	1418650
PP-13D	586300	1417300
PP-16D	596550	1414850
PP-21D	594850	1416800
PP-26D	587550	1418450
PP-27D	589750	1414250
PP-28D	590100	1414400
PP-29D	589150	1414500
PP-30D	589150	1414000
PP-31D	590700	1414150
PP-32D	589850	1416980
PP-33D	589850	1415900
PP-37D	594150	1415700
PP-38D	591750	1413550
PP-39D	593900	1415250
PP-44D	592000	1413490

Tabla No.A.2. Pozos de Observación año 2002

No. Pozo	Localización	Comarca	Municipio	Coordenadas		Carga Observada m.s.n.m	Carga Calculada m.s.n.m	Diferencia entre Carga Observada y Calculada (m)
				Este	Norte			
104N	El Escobillo	Darío	Darío	592399	1415152	429.60	430.15	0.55
161N	Sabana Verde	Darío	Darío	592646	1414691	427.90	428.35	0.45
164N	Sabana Verde	Darío	Darío	591816	1414333	425.40	427.73	2.33
165N	Sabana Verde	Darío	Darío	591540	1414168	425.20	426.79	1.59
37N	El Horno	Darío	Darío	590340	1415684	430.96	432.24	1.28
111N	Las Mangas	San Isidro	San Isidro	586085	1418800	440.41	437.00	-3.41
113N	Quebrada Honda	El Zapote	San Isidro	587768	1417757	438.70	436.63	-2.07
114N	Quebrada Honda	El Zapote	San Isidro	587642	1417061	439.90	436.74	-3.16
116N	Las Mangas	San Isidro	San Isidro	584462	1418573	440.45	439.19	-1.26
117N	Las Mangas	San Isidro	San Isidro	584341	1418505	441.44	439.19	-2.25
121N	El Jocote	San Isidro	San Isidro	586082	1422062	440.24	438.01	-2.23
122N	El Jocote	San Isidro	San Isidro	586030	1422011	440.90	438.01	-2.89
123N	La Lagunita	San Isidro	San Isidro	586510	1423994	435.16	437.79	2.63
125N	San Isidro	San Isidro	San Isidro	587602	1428848	460.45	460.36	-0.09
126N	San Isidro	San Isidro	San Isidro	587578	1428814	460.25	460.36	0.11
130N	San Pablo	San Pablo	San Isidro	589024	1426520	438.18	438.12	-0.06
132N	San Pablo	San Pablo	San Isidro	588817	1426095	435.77	437.79	2.02
133N	La Central	San Isidro	San Isidro	588664	1424868	436.09	436.85	0.76
136N	San Roque	San Isidro	San Isidro	588549	1421670	433.14	436.58	3.44
146N	La Central	San Isidro	San Isidro	588778	1424463	434.10	436.35	2.25
147N	La Central	San Isidro	San Isidro	588900	1424007	434.30	436.33	2.03
149N	Arrocera del Valle	San Isidro	San Isidro	590110	1424295	432.95	435.46	2.51
151N	Río Viejo	Río Viejo	San Isidro	593199	1426160	435.04	434.88	-0.16
31N	Paso Real	San Isidro	San Isidro	590022	1419642	435.12	434.17	-0.95
41N	Arrocera del Valle	San Isidro	San Isidro	592730	1423951	432.10	433.84	1.74
46N	Arrocera del Valle	San Isidro	San Isidro	592454	1424505	434.16	434.09	-0.07
52N	Valle	San Isidro	San Isidro	591336	1423584	433.00	433.81	0.81
53N	Kansas	Río Viejo	San Isidro	591830	1425095	430.35	434.19	3.84
58N	San Pablo	San Isidro	San Isidro	588279	1426468	436.08	438.10	2.02
59N	San Pablo	San Isidro	San Isidro	589240	1425176	437.18	436.99	-0.19
10N	Chagüitillo	Chaguitillo	Sébaco	599091	1424831	440.44	438.07	-2.37
14N	Santiago	Chaguitillo	Sébaco	597434	1425672	437.96	436.70	-1.26

Tabla No.A.2. Pozos de Observación año 2002. Continuación

No. Pozo	Localización	Comarca	Municipio	Coordenadas		Carga Observada m.s.n.m	Carga Calculada m.s.n.m	Diferencia entre Carga Observada y Calculada (m)
				Este	Norte			
16N	Los Polavasales	Chaguitillo	Sébaco	597887	1424593	437.93	434.73	-3.20
176N	Los Esteros	Sébaco	Sébaco	595736	1418824	431.83	432.85	1.02
18N	Tierra Blanca	Chaguitillo	Sébaco	597015	1423432	431.69	433.87	2.18
1N	El Ojochal	Chaguitillo	Sébaco	599188	1431242	452.92	454.58	1.66
22N	Tierra Blanca	Chaguitillo	Sébaco	596425	1424453	435.04	434.41	-0.63
25N	La Virginia	Río Viejo	Sébaco	595158	1426137	432.56	434.50	1.94
39N	El Limón	Sébaco	Sébaco	593574	1420486	428.26	432.49	4.23
42N	San Benito	Sébaco	Sébaco	592290	1422666	432.11	433.20	1.09
43N	San Benito	Sébaco	Sébaco	592292	1422650	431.85	433.20	1.35
44N	San Benito	Sébaco	Sébaco	591729	1422187	434.87	433.74	-1.13
47N	San Benito	Sébaco	Sébaco	592089	1422130	433.44	433.09	-0.35
48N	San Benito	Sébaco	Sébaco	590972	1421530	434.25	434.10	-0.15
63N	Chaguitillo	Chaguitillo	Sébaco	599345	1424388	438.94	439.36	0.42
64N	Santa Isabel	Chaguitillo	Sébaco	598985	1423915	432.42	436.27	3.85
66N	Las Delicias	Chaguitillo	Sébaco	598100	1422807	436.42	433.43	-2.99
67N	Las Delicias	Chaguitillo	Sébaco	598100	1422840	436.50	433.43	-3.07
68N	Pozo ENACAL	Sébaco	Sébaco	596868	1421623	432.20	433.48	1.28
69N	Sébaco	Sébaco	Sébaco	595575	1421648	434.18	433.07	-1.11
71N	Sébaco	Sébaco	Sébaco	594921	1421316	433.85	433.00	-0.85
79N	Sébaco	Sébaco	Sébaco	595771	1420513	431.90	432.99	1.09
85N	La Chimpinilla	Sébaco	Sébaco	592228	1419828	429.12	432.22	3.10
86N	La Chimpinilla	Sébaco	Sébaco	592765	1419506	429.20	432.26	3.06

Tabla No.A.3. Balance Hídrico de Suelos – Textura Franco Arenoso

BALANCE HIDRICO DE SUELOS  
Chaguitillo  
Valle de Sébaco

Textura de suelo = **FRANCO ARENOSO**  
 Capac.infiltrac.(Fc) = **14.3** mm/h  
 Capac.campo(CC) [%]= **14.85** 74.25 mm  
 Pto.marchitez(PM) [%]= **6.6** 33 mm  
 Prof.raíces media(mm)= **500** mm  
 CC-PM= 41.3 mm

P = precipitación media del sector  
 343.2 Cf = coeficiente de infiltración  
 Pi = precipitación que infiltra  
 Pe = precipitación que escurre  
 ETP = evapotranspiración potencial (Hargreaves, Herreara, 1985)  
 HSi = humedad de suelo inicial  
 AgD = agua disponible después de ETP  
 HSF = humedad de suelo final  
 DCC = déficit de capacidad de campo  
 Rp = recarga potencial al acuífero  
 ETR = evapotranspiración real  
 NR = necesidad de riego

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Totales	% P
P (mm)	3	1.125	7.75	22.8	143.6	149.75	69.75	104.075	183.725	162.75	45.725	5.95	900.00	100.0
Cf (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
Pi (mm)	3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00	100.0
Pe (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Pe (m3/ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ETP (mm)	116.82779	102.7046	103.3054	102.4895	96.175001	96.38447	91.1786	90.18258	85.1354	84.21398	104.9849	112.1714	1185.75	
HSi (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41.25	41.25	19.82	33.71	41.25	41.25	0.00		
AgD (mm)	-113.83	-101.58	-95.56	-79.69	47.42	53.37	-21.43	13.89	98.59	78.54	-59.26	-106.22		
HSF (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	41.25	41.25	19.82	33.71	41.25	41.25	0.00	0.00		
cHS (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	41.25	0.00	-21.43	13.89	7.54	0.00	-41.25	0.00		
DCC (mm)	41.25	41.25	41.25	41.25	0.00	0.00	21.43	7.54	0.00	0.00	41.25	41.25		
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	6.17	53.37	0.00	0.00	91.05	78.54	0.00	0.00	229.13	25.5
Rp (m3/ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	61.75	533.66	0.00	0.00	910.53	785.36	0.00	0.00	2291.30	
ETR (mm)	3.00	1.13	7.75	22.80	96.18	96.38	91.18	90.18	85.14	84.21	86.98	5.95	670.87	74.5
NR (mm)	41.25	41.25	41.25	41.25	0.00	0.00	21.43	7.54	0.00	0.00	41.25	41.25	276.46	30.7

Tablado. A.4. Balance Hídrico de Suelos – Textura Arenoso

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Arenoso Txm
--

Textura de suelo = **Arenoso**

Capac.infiltrac.(Fc) = **34.3** mm/h

Capac.campo(CC) [%]= **14.85** 111.375 mm

Pto.marchitez(PM) [%]= **6.6** 49.5 mm

Prof.raíces media(mm)= **750** mm

CC-PM= 61.9 mm

P = precipitación media del sector

823.2 Cf = coeficiente de infiltración

Pi = precipitación que infiltra

Pe = precipitación que escurre

ETP = evapotranspiración potencial (Hargreaves, Herreara, 1985)

HSi = humedad de suelo inicial

AgD = agua disponible después de ETP

HSf = humedad de suelo final

DCC = déficit de capacidad de campo

Rp = recarga potencial al acuífero

ETR = evapotranspiración real

NR = necesidad de riego

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Totales	% P
P (mm)	3	1.125	7.75	22.8	143.6	149.75	69.75	104.075	183.725	162.75	45.725	5.95	900.00	100.0
Cf (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
Pi (mm)	3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00	100.0
Pe (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Pe(m3/ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ETP (mm)	116.82779	102.7046	103.3054	102.4895	96.175001	96.38447	91.1786	90.18258	85.1354	84.21398	104.9849	112.1714	1185.75	
HSi (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.42	61.88	40.45	54.34	61.88	61.88	2.62		
AgD (mm)	-113.83	-101.58	-95.56	-79.69	47.42	53.37	-21.43	13.89	98.59	78.54	-59.26	-106.22		
HSf (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	47.42	61.88	40.45	54.34	61.88	61.88	2.62	0.00		
cHS (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	47.42	14.45	-21.43	13.89	7.54	0.00	-59.26	-2.62		
DCC (mm)	61.88	61.88	61.88	61.88	14.45	0.00	21.43	7.54	0.00	0.00	59.26	61.88		
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.92	0.00	0.00	91.05	78.54	0.00	0.00	208.50	23.2
Rp(m3/ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	389.16	0.00	0.00	910.53	785.36	0.00	0.00	2085.05	
ETR (mm)	3.00	1.13	7.75	22.80	96.18	96.38	91.18	90.18	85.14	84.21	104.98	8.57	691.50	76.8
NR (mm)	61.88	61.88	61.88	61.88	14.45	0.00	21.43	7.54	0.00	0.00	59.26	61.88	412.05	45.8

Tabla No.A.5. Balance Hídrico de Suelos – Textura Franco Arenoso

BALANCE HIDRICO DE SUELOS AluvialTxm Valle de Sébaco
--

Textura de suelo = **Franco arenoso**  
 Capac.infiltrac.(Fc) = **12.3 mm/h**  
 Capac.campo(CC) [%]= **21** 157.5 mm  
 Pto.marchitez(PM) [%]= **9** 67.5 mm  
 Prof.raíces media(mm)= **750 mm**  
 CC-PM= **90 mm**

P = precipitación media del sector  
 295.2 Cf = coeficiente de infiltración  
 Pi = precipitación que infiltra  
 Pe = precipitación que escurre  
 ETP = evapotranspiración potencial (Hargreaves, Herreara, 1985)  
 HSi = humedad de suelo inicial  
 AgD = agua disponible después de ETP  
 HSf = humedad de suelo final  
 DCC = déficit de capacidad de campo  
 Rp = recarga potencial al acuífero  
 ETR = evapotranspiración real  
 NR = necesidad de riego

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Totales	% P
P (mm)	3	1.125	7.75	22.8	143.6	149.75	69.75	104.075	183.725	162.75	45.725	5.95	900.00	100.0
Cf (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
Pi (mm)	3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00	100.0
Pe (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Pe(m3/ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ETP (mm)	116.82779	102.7046	103.3054	102.4895	96.175001	96.38447	91.1786	90.18258	85.1354	84.21398	104.9849	112.1714	1185.75	
HSi (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.42	90.00	68.57	82.46	90.00	90.00	30.74		
AgD (mm)	-113.83	-101.58	-95.56	-79.69	47.42	53.37	-21.43	13.89	98.59	78.54	-59.26	-106.22		
HSf (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	47.42	90.00	68.57	82.46	90.00	90.00	30.74	0.00		
cHS (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	47.42	42.58	-21.43	13.89	7.54	0.00	-59.26	-30.74		
DCC (mm)	90.00	90.00	90.00	90.00	42.58	0.00	21.43	7.54	0.00	0.00	59.26	90.00		
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.79	0.00	0.00	91.05	78.54	0.00	0.00	180.38	20.0
Rp (m3/ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	107.91	0.00	0.00	910.53	785.36	0.00	0.00	1803.80	
ETR (mm)	3.00	1.13	7.75	22.80	96.18	96.38	91.18	90.18	85.14	84.21	104.98	36.69	719.62	80.0
NR (mm)	90.00	90.00	90.00	90.00	42.58	0.00	21.43	7.54	0.00	0.00	59.26	90.00	580.80	64.5

Tabla No.A.6. Balance Hídrico de Suelos – Textura Arcilloso

BALANCE HIDRICO DE SUELOS Suelo Arcilloso Valle de Sébaco
---

Textura de suelo = <b>Arcilloso</b>	P = precipitación media del sector
Capac.infiltrac.(Fc) = <b>4 mm/h</b>	Cf = coeficiente de infiltración
Capac.campo(CC) [%]= <b>45.5</b> 136.5 mm	Pi = precipitación que infiltra
Pto.marchitez(PM) [%]= <b>19.5</b> 58.5 mm	Pe = precipitación que escurre
Prof.raíces media (mm)= <b>300 mm</b>	ETP = evapotranspiración potencial (Hargreaves, Herreara, 1985)
CC-PM= <b>78 mm</b>	HSi = humedad de suelo inicial
120	AgD = agua disponible después de ETP
	HSf = humedad de suelo final
	DCC = déficit de capacidad de campo
	Rp = recarga potencial al acuífero
	ETR = evapotranspiración real
	NR = necesidad de riego

Variables	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Totales	% P
P (mm)	3	1.125	7.75	22.8	143.6	149.75	69.75	104.075	183.725	162.75	45.725	5.95	900.00	100.0
Cf (mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.62	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50		
Pi (mm)	1.50	0.56	3.88	11.40	71.80	74.88	43.25	52.04	91.86	81.38	22.86	2.98	458.37	50.9
Pe (mm)	1.50	0.56	3.88	11.40	71.80	74.88	26.51	52.04	91.86	81.38	22.86	2.98	441.63	49.1
Pe(m3/ha)	15.00	5.63	38.75	114.00	718.00	748.75	265.05	520.38	918.63	813.75	228.63	29.75	4416.30	
ETP (mm)	116.82779	102.7046	103.3054	102.4895	96.175001	96.38447	91.1786	90.18258	85.1354	84.21398	104.9849	112.1714	1185.75	
HSi (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.73	3.89	0.00		
AgD (mm)	-115.33	-102.14	-99.43	-91.09	-24.38	-21.51	-47.93	-38.15	6.73	-2.84	-82.12	-109.20		
HSf (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.73	3.89	0.00	0.00		
cHS (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.73	-2.84	-3.89	0.00		
DCC (mm)	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	71.27	74.11	78.00	78.00		
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.0
Rp(m3/ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ETR (mm)	1.50	0.56	3.88	11.40	71.80	74.88	43.25	52.04	85.14	84.21	26.75	2.98	458.37	50.9
NR (mm)	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	71.27	74.11	78.00	78.00	925.38	102.8

## Cálculo de la Recarga Mediante la Fórmula Analítica Schosinsky-Losilla

$$I=0.88CP$$

I = Infiltración Potencial (mm/mes)

$C = (K_{fc} + K_p + K_v)$

$K_{fc}$  - Coeficiente de Infiltración por textura de suelo (tanto por uno)

$$K_{fc} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154fc - 0.723$$

$fc$  - Infiltración básica del suelo (mm/día)

$K_p$  – Fracción que infiltra por efecto de pendiente

$K_v$ - Fracción que infiltra por cobertura vegetal

Tabla No.A.7. Balance Hídrico de Suelos – Fórmula Analítica Schosinsky-Losilla

**a**

Tipo de Suelo	Vertisol	Chaguitillo	Aluvial	San Isidro	Vertisol
		Arenoso	Arenoso Franco	Arenoso	
$fc$ - mm/día	96	343.2	295.2	823.2	120
$K_{fc}$	0.48	0.78	0.75	0.94	0.54

**b**

Tipo de Suelo/Cálculo del Coeficiente	Vertisol	Chaguitillo Arenoso	Aluvial Arenoso Franco	San Isidro Arenoso	Vertisol
$K_{fc}$	0.48	0.78	0.75	0.94	0.54
$K_p$	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
$K_v$	0.10	0.20	0.30	0.40	0.10
$C = (K_{fc} + K_p + K_v)$	0.76	1.16	1.23	1.52	0.82

**c**

Tipo de Suelo	Area Cubierta m	Recarga Potencial m	Recarga Total MMC
Vertisol	75756000	0.6	45.4536
Chaguitillo	26736000	0.8	21.3888
San Isidro	26288000	0.8	21.0304
<b>Total</b>			<b>87.8728</b>

d

<b>Cálculo de la Recarga por el Método Analítico Schosinsky G., Losilla M. 1999</b>													
Para prueba de Infiltración en Vertisoles													
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (mm)	3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00
Coeficiente	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	
C	0	0	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	
Recarga Potencial (mm)	0.00	0.00	5.18	15.25	96.04	100.15	46.65	69.61	122.88	108.85	30.58	3.98	599.16
Para prueba de Infiltración en Suelo Arenoso (Chaguitillo)													
Precipitación	3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00
Coeficiente	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	
C	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Recarga Potencial	0.00	0.00	6.82	20.06	126.37	131.78	61.38	91.59	161.68	143.22	40.24	5.24	788.37
Para prueba de Infiltración en Suelo Franco Arenoso (Aluvial)													
Precipitación	3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00
Coeficiente	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	
C	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Recarga Potencial	0.00	0.00	6.82	20.06	126.37	131.78	61.38	91.59	161.68	143.22	40.24	5.24	788.37
Para prueba de Infiltración en Suelo Arenoso (San Isidro)													
Precipitación	3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00
Coeficiente	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	
C	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Recarga Potencial	0.00	0.00	6.82	20.06	126.37	131.78	61.38	91.59	161.68	143.22	40.24	5.24	788.37
Para prueba de Infiltración en Vertisoles													
Precipitación	3.00	1.13	7.75	22.80	143.60	149.75	69.75	104.08	183.73	162.75	45.73	5.95	900.00
Coeficiente	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	
C	0	0	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	
Recarga Potencial	0.00	0.00	5.59	16.45	103.62	108.06	50.33	75.10	132.58	117.44	33.00	4.29	646.46

Tabla No.A.8. Pozos de Explotación y Caudal de Extracción

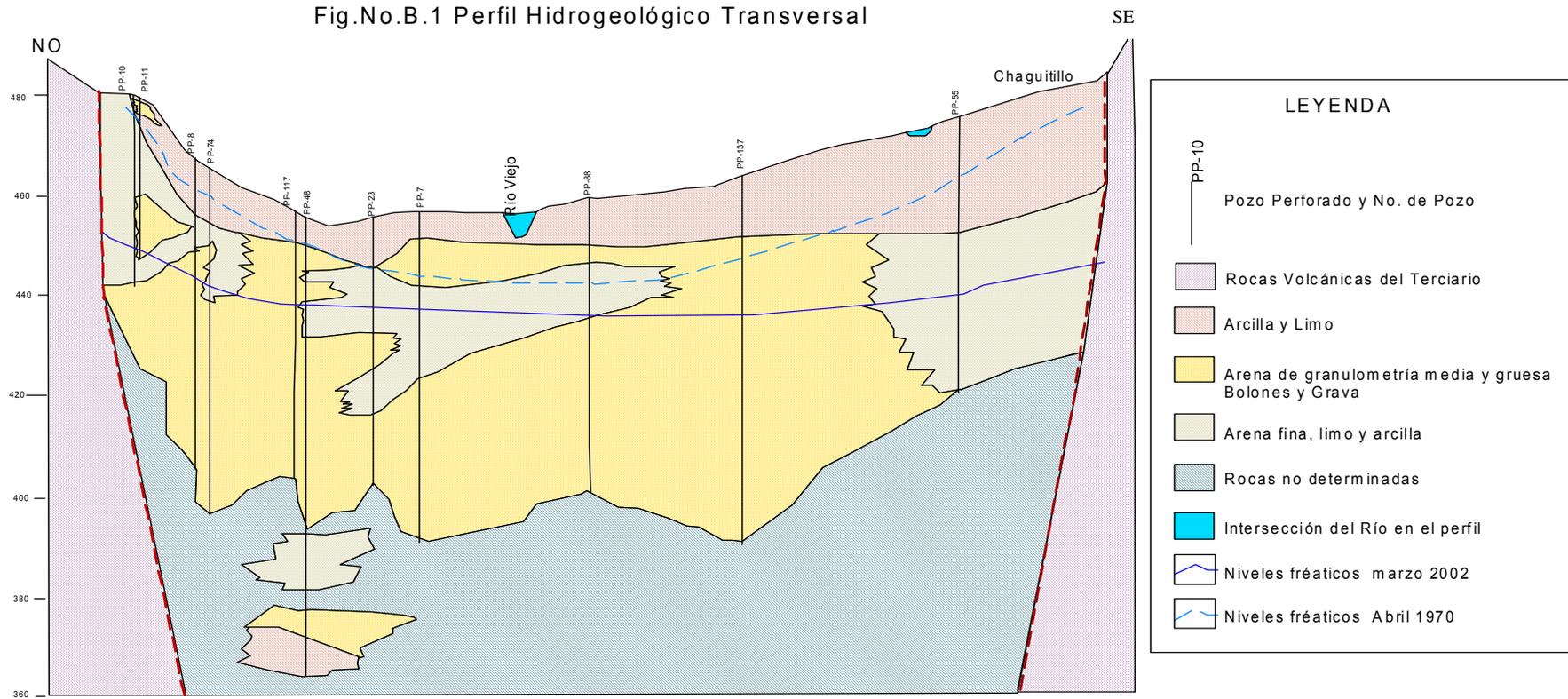
No. Pozo	Uso	Localidad	Municipio	Caudal de Extracción (m <sup>3</sup> /día)
1N	Hortalizas	Chaguitillo	Sébaco	25.55
10N	Potable	Chaguitillo	Sébaco	60
13N	Potable	Chaguitillo	Sébaco	3.89
14N	Arroz	Chaguitillo	Sébaco	2650
16N	Arroz	Chaguitillo	Sébaco	2275
18N	Arroz	Chaguitillo	Sébaco	2650
22N	Arroz	Chaguitillo	Sébaco	2650
23N	Arroz	La Concepción	Sébaco	2650
25N	Arroz	Carreta Quebrada	Sébaco	2650
26N	Arroz	Carreta Quebrada	Sébaco	2650
28N	Potable	Paso Carreta	Sébaco	25
29N	Arroz	San Benito	San Isidro	2650
30N	Arroz	San Benito	San Isidro	2650
31N	Arroz	Paso Real	San Isidro	2650
35N	Arroz	San José	Sébaco	1360
39N	Arroz	El Limón	Sébaco	1360
40N	Potable	Río Viejo	Sébaco	25
41N	Arroz	San Martín	Sébaco	1360
42N	Arroz	San Benito	San Isidro	1360
44N	Arroz	San Benito	San Isidro	1360
46N	Arroz	San Benito	San Isidro	2650
47N	Arroz	San Benito	San Isidro	2650
48N	Arroz	San Benito	San Isidro	2650
49N	Arroz	San Benito	San Isidro	2560
52N	Arroz	San Benito	San Isidro	2650
53N	Arroz	San Benito	San Isidro	2650
54N	Arroz	San Benito	San Isidro	2650
57N	Arroz	Kansas	San Isidro	1360
58N	Hortalizas	San Isidro	San Isidro	1084
59N	Hortalizas	San Isidro	San Isidro	1084
60N	Hortalizas	San Isidro	San Isidro	1084
61N	Potable	Chaguitillo	Sébaco	30
62N	Arroz	Chaguitillo	Sébaco	1360
63N	Potable	Santa Isabel	Sébaco	60
64N	Potable	Beneficio	Sébaco	60
66N	Arroz	Tierra Blanca	Sébaco	1360
67N	Arroz	Tierra Blanca	Sébaco	1360
68N	Potable	Sébaco	Sébaco	95
69N	Arroz	Tierra Blanca	Sébaco	2650
71N	Hortalizas	El Guanacaste	Sébaco	1084

Tabla No.A.8. Pozos de Explotación y Caudal de Extracción. Continuación

No. Pozo	Uso	Localidad	Municipio	Caudal de Extracción (m <sup>3</sup> /día)
75N	Arroz	Tierra Blanca	Sébaco	1360
79N	Arroz	Tierra Blanca	Sébaco	1360
80N	Hortalizas	Río Nuevo	Sébaco	1084
81N	Hortalizas	Río Nuevo	Sébaco	1084
82N	Hortalizas	Río Nuevo	Sébaco	1084
85N	Hortalizas	San Antonio	Sébaco	1084
86N	Hortalizas	El Limón	Sébaco	1084
88N	Hortalizas	El Limón	Sébaco	1084
89N	Hortalizas	El Limón	Sébaco	1084
97N	Hortalizas	El Limón	Sébaco	1084
100N	Potable	Sabana Verde	Darío	70
103N	Potable	Sabana Verde	Darío	60
104N	Potable	Sabana Verde	Darío	60
107N	Potable	Dos Montes	Darío	60
108N	Potable	Las Tunas	Darío	60
111N	Arroz	Las Mangas	San Isidro	1360
113N	Potable	Quebrada Honda	San Isidro	30
114N	Potable	La Majadita	San Isidro	30
116N	Potable	Las Mangas	San Isidro	30
117N	Potable	Las Mangas	San Isidro	30
118N	Potable	El Zapote	San Isidro	30
125N	Potable	San Isidro	San Isidro	95
126N	Potable	San Isidro	San Isidro	95
127N	Potable	San Isidro	San Isidro	95
130N	Hortalizas	San Pablo	San Isidro	1084
132N	Hortalizas	San Pablo	San Isidro	1084
133N	Hortalizas	San Pablo	San Isidro	1084
136N	Arroz	La Central	San Isidro	1360
140N	Arroz	San Benito	San Isidro	1360
145N	Arroz	La Central	San Isidro	1360
146N	Arroz	La Central	San Isidro	1360
147N	Arroz	La Central	San Isidro	1360
149N	Arroz	San Benito	San Isidro	1360
151N	Arroz	Río Viejo	San Isidro	2650
155N	Potable	Las Tunas	Darío	30
156N	Potable	Apompuá	Darío	30
157N	Potable	Dos Montes	Darío	30
159N	Potable	Dos Montes	Darío	60
161N	Potable	Sabana Verde	Darío	60
120N	Potable	El Jocote	San Isidro	30
121N	Potable	El Jocote	San Isidro	30
122N	Potable	El Jocote	San Isidro	30
123N	Potable	La Lagunita	San Isidro	30
124N	Potable	La Lagunita	San Isidro	30

# **ANEXO B**

Fig.No.B.1 Perfil Hidrogeológico Transversal



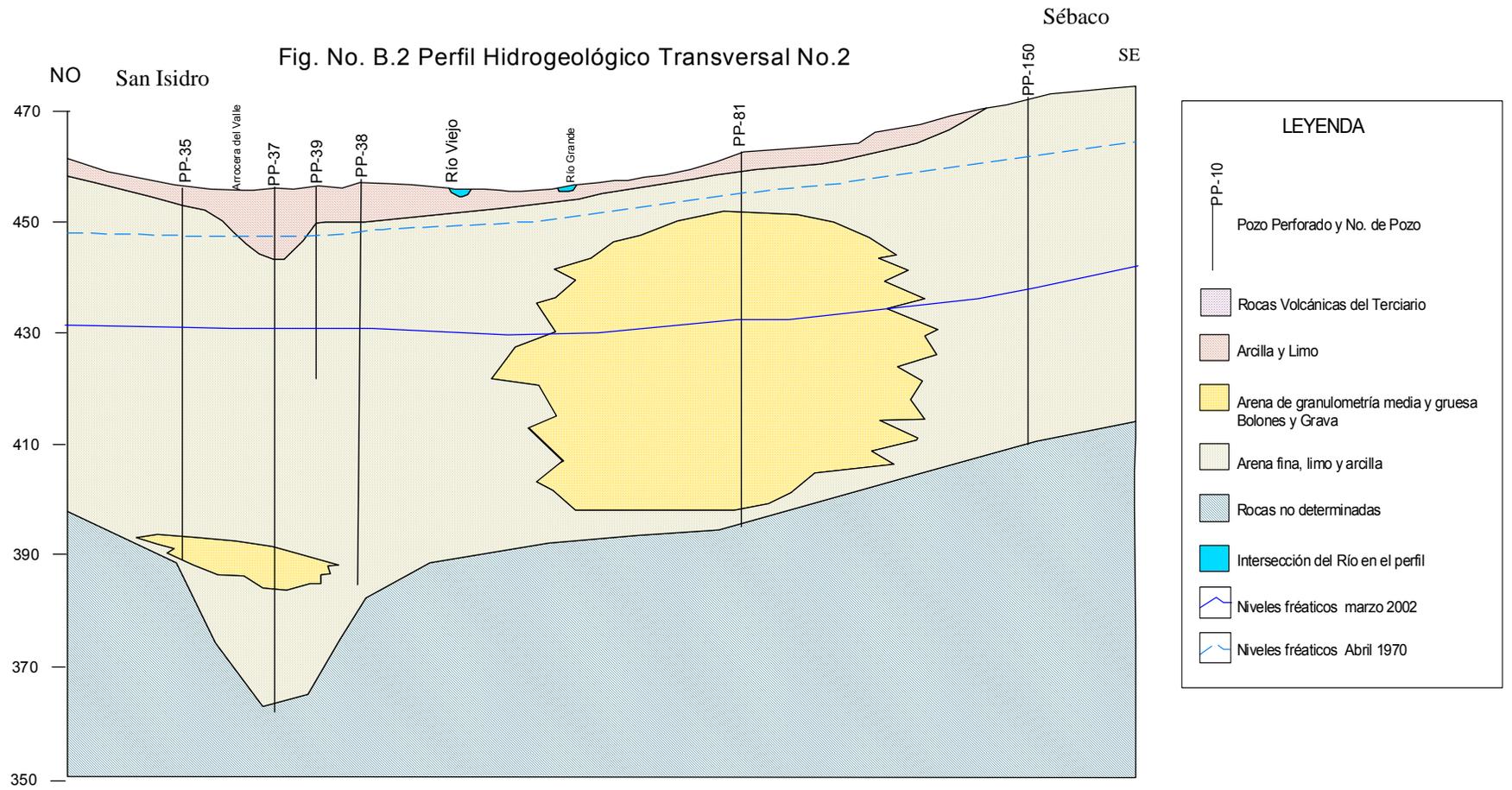


Fig. No.3.B. Perfil Hidrogeológico Transversal No.3

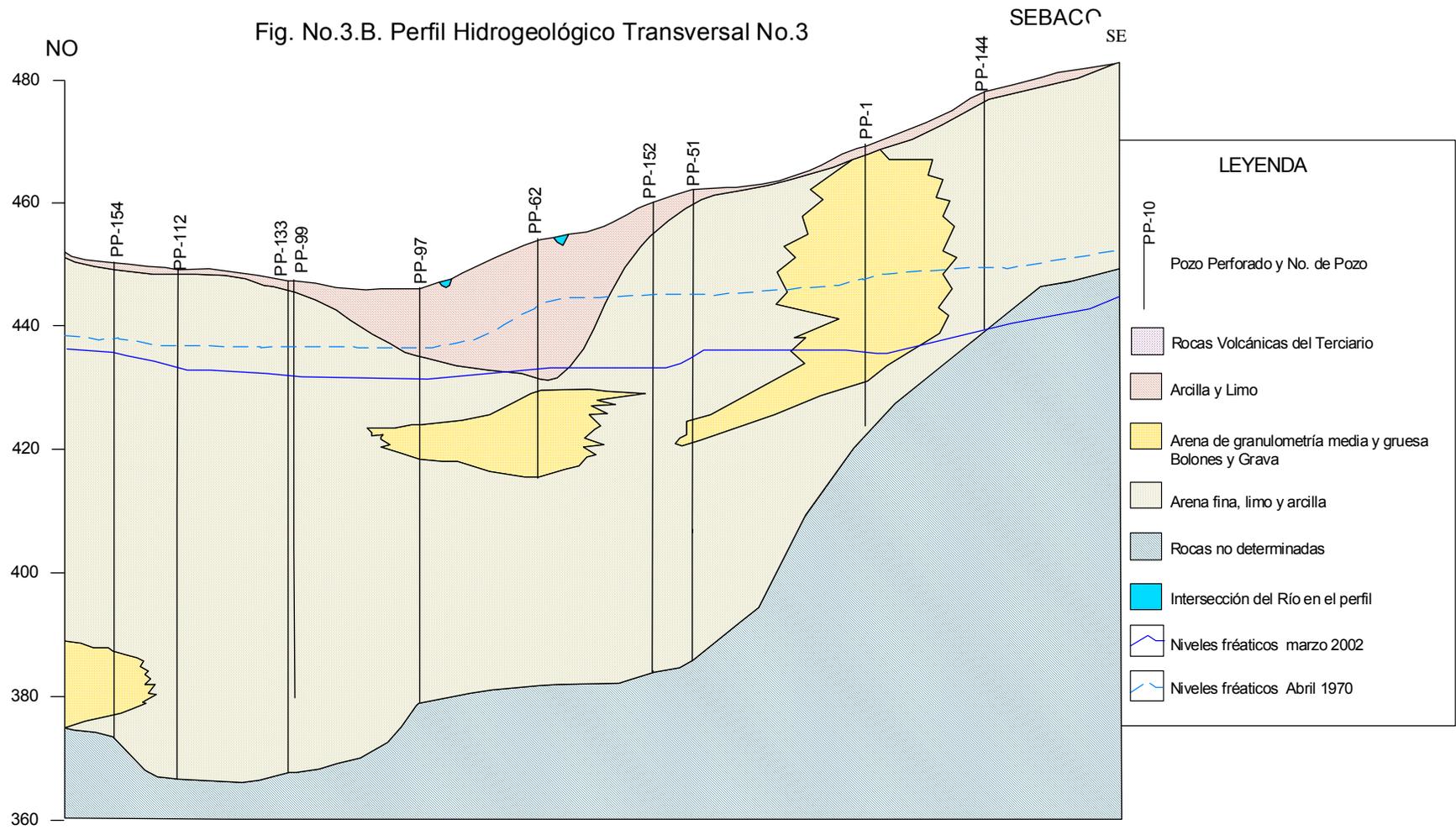
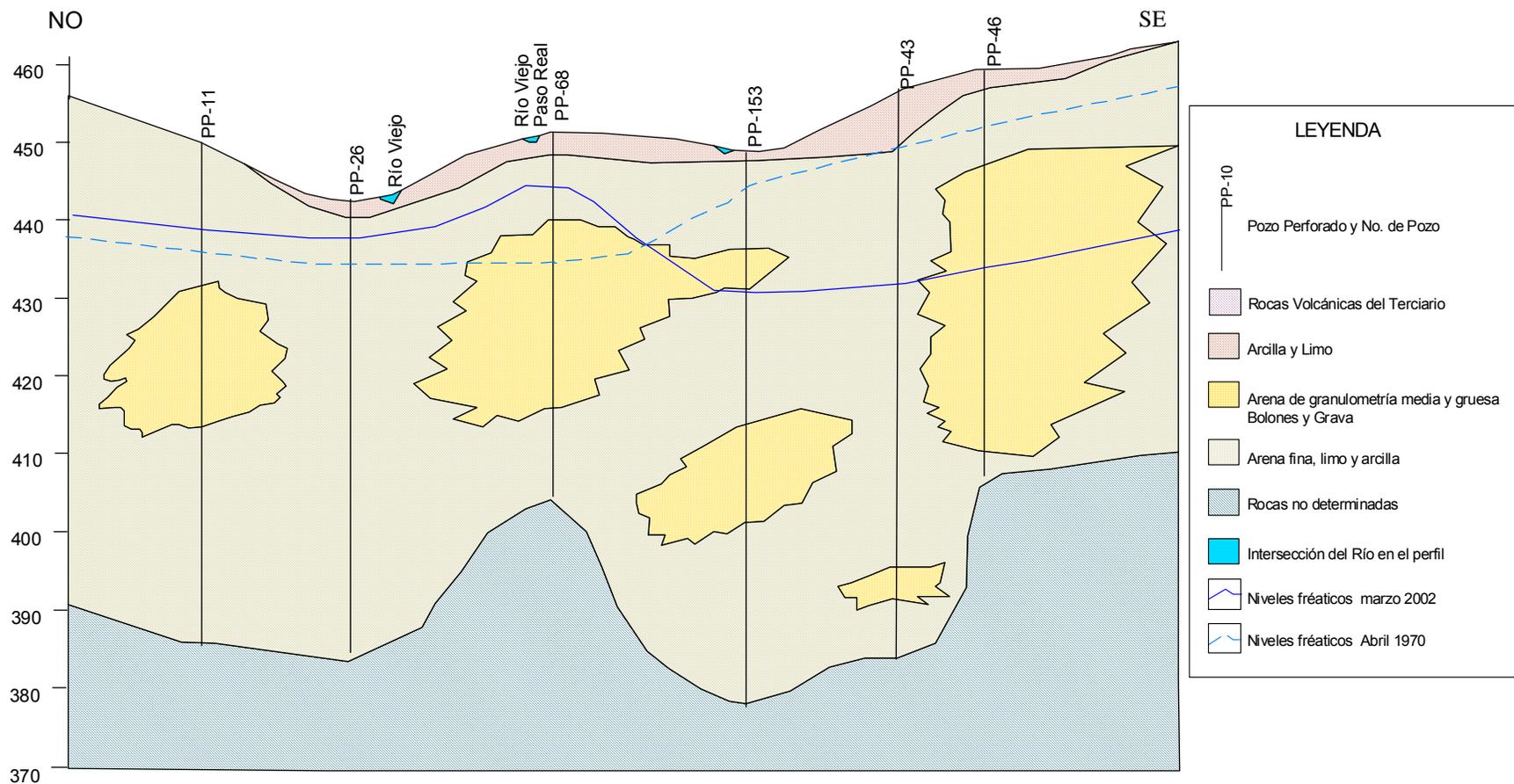


Fig. No.B.4 Perfil Hidrogeológico Transversal No.4



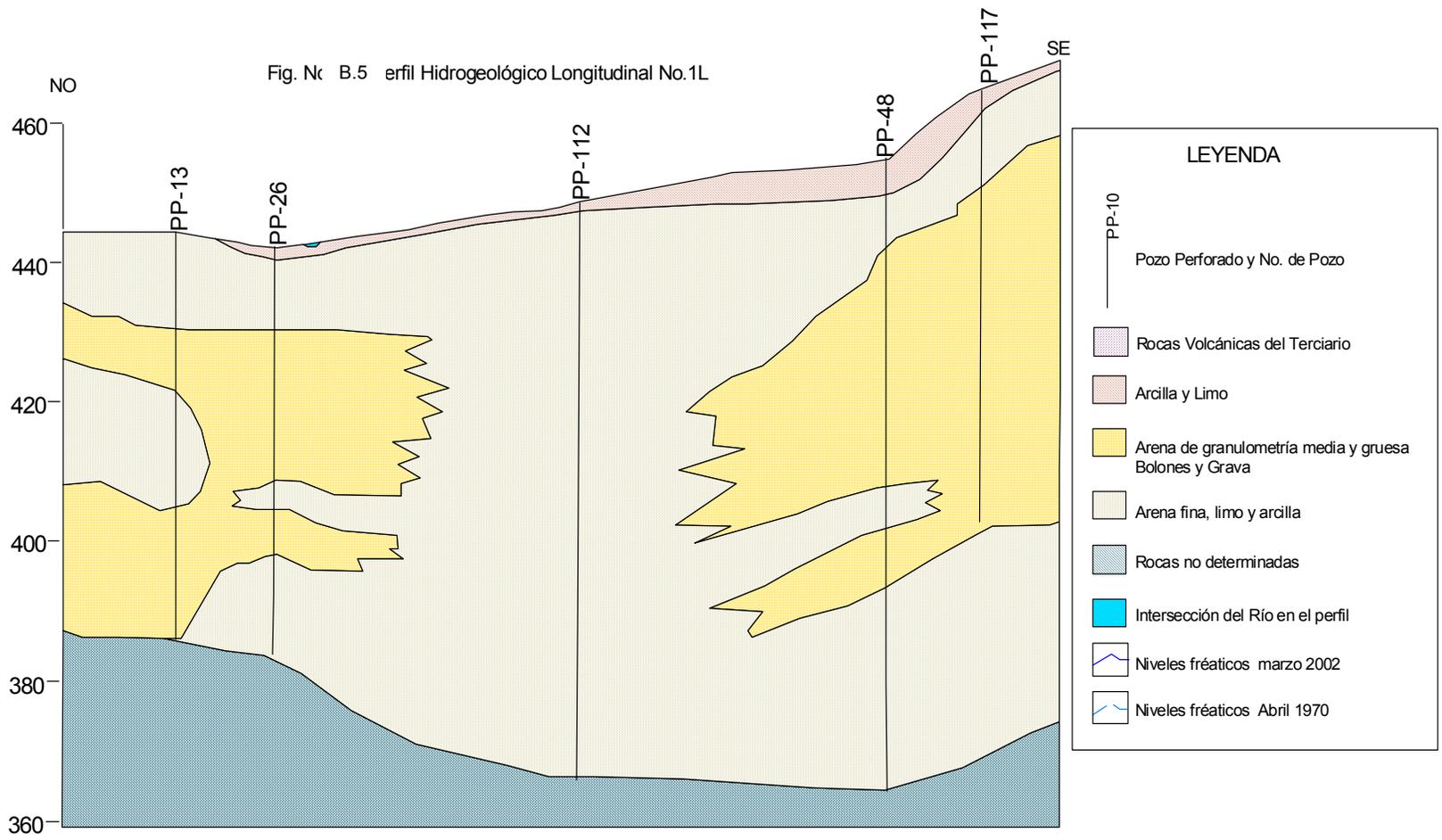
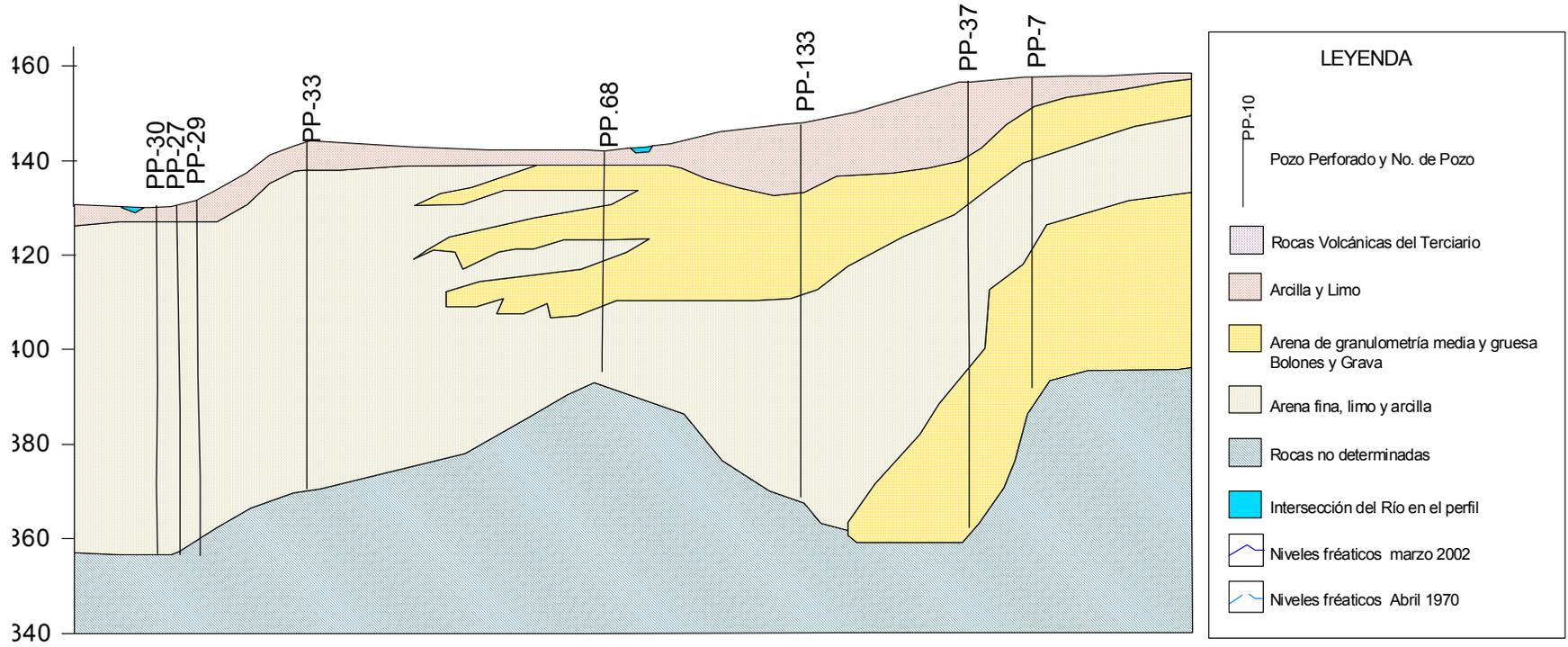


Fig. No.B.6. Perfil Hidrogeológico Transversal No.2L



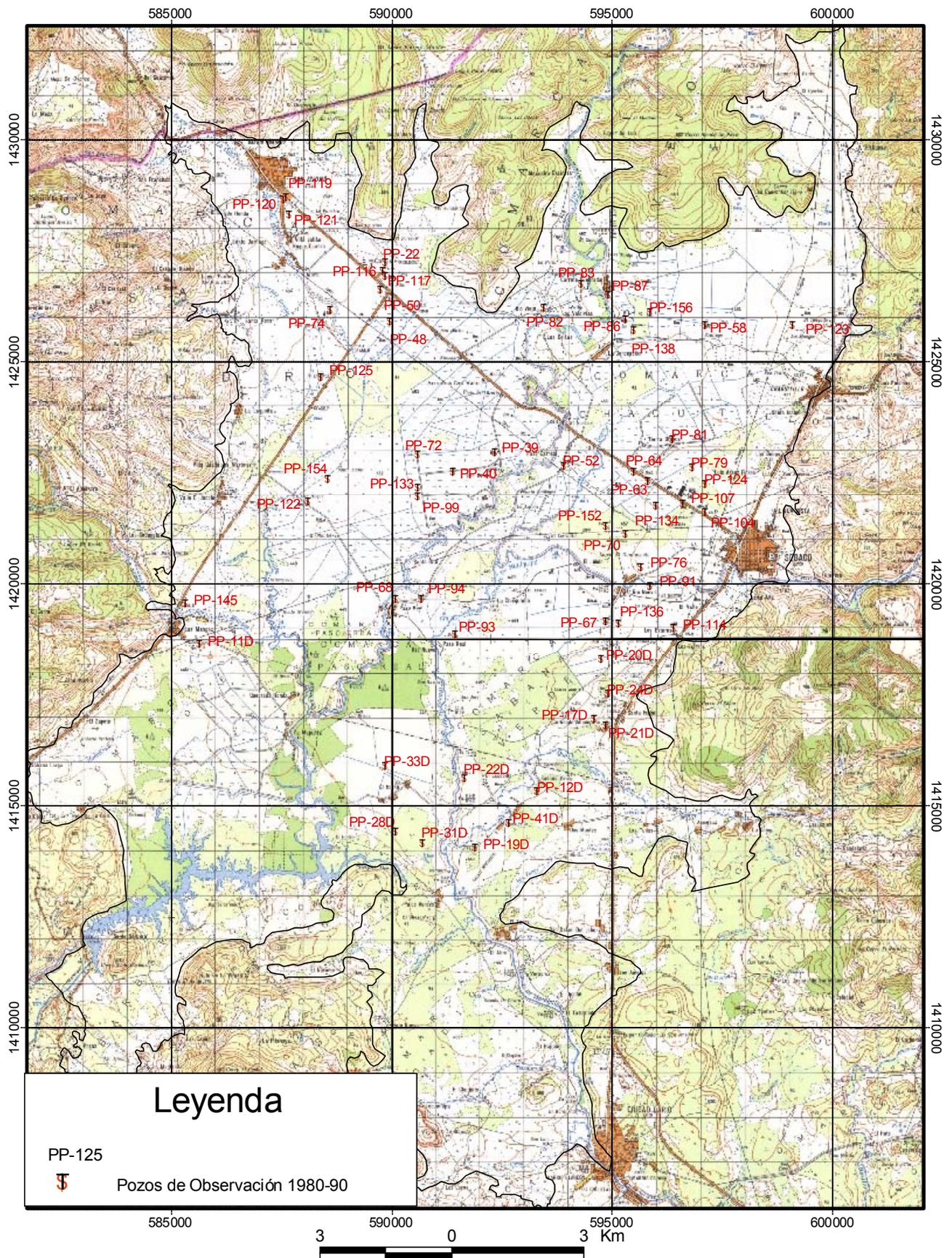


Fig.No.B.7. Pozos de Observación 1980-1990

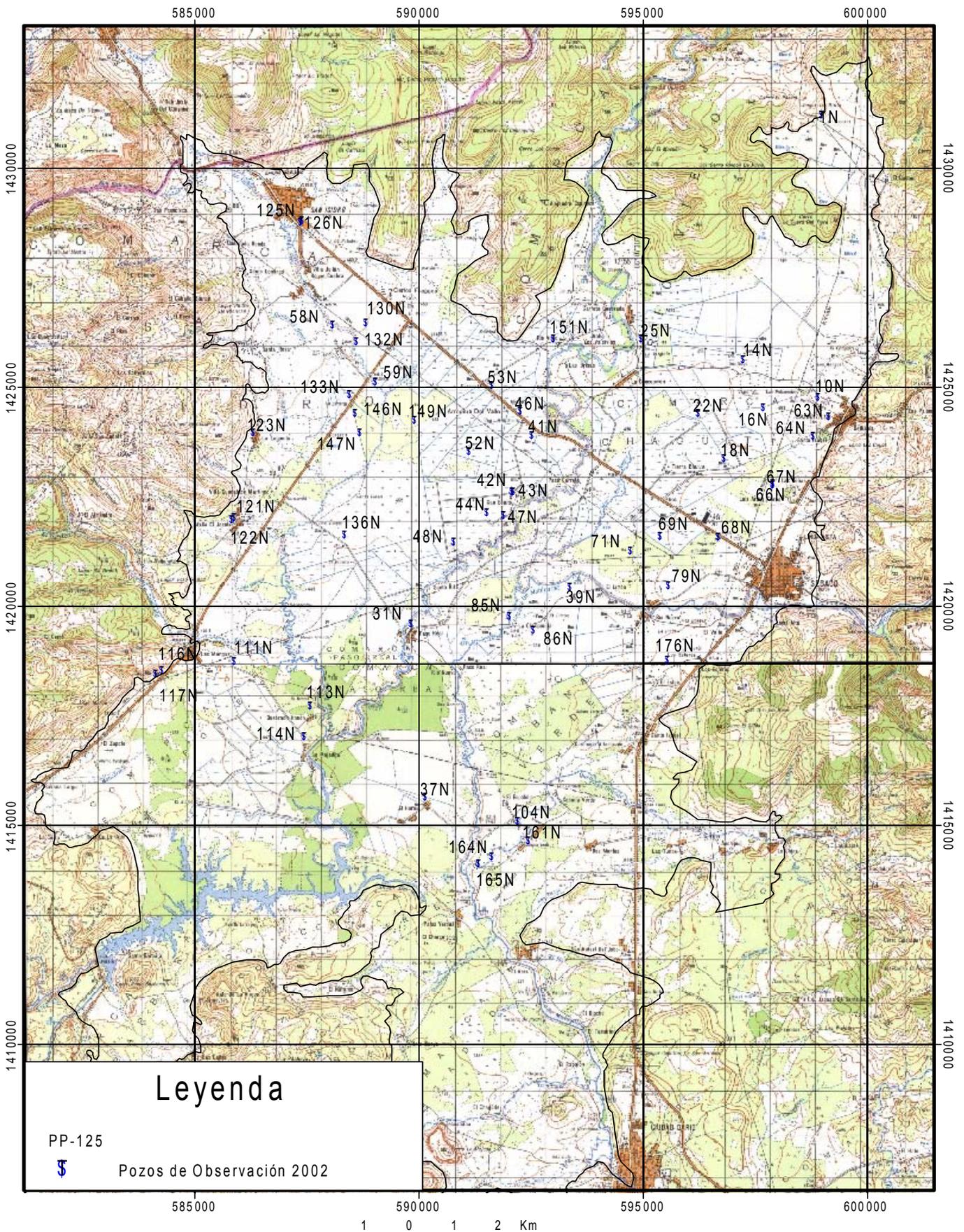


Fig.No.B.8. Pozos de Observación 2002