



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA
INGENIERÍA GEOLÓGICA**

TÍTULO:

**“Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II,
Cuenca Sur del Lago de Managua”.**

MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA EN GEOLOGÍA

PRESENTADO POR:

Br. Erika Judith Sánchez Alemán

TUTOR:

M.Sc. Lener Sequeira Gómez

ASESORES:

PhD. Carlos Rubí (Asesor Geológico)

M.Sc. Karen Acevedo Mena (Asesor metodológico)

Managua, 18 de Enero del 2020.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico primeramente a Dios, quien merece toda la honra y gloria de cada meta propuesta en mi vida, por darme la bendición cada día, la vida, salud y fuerzas de no desmayar hasta conseguir lo que deseo.

A mis padres, Catalina Alemán López y Freddy José Sánchez Martínez, por ser los pilares de mi vida, por el deseo de superación que me brindan día a día, por educarme con valores para ser una mejor persona, por brindarme el futuro de sus esfuerzos y sacrificios para ofrecerme un mañana mejor.

A mis hermanas. A mis sobrinos, a quienes deseo apoyar en sus estudios y tengan oportunidades de un mejor futuro.

A mis abuelos que ya no están conmigo, pero que siempre me aconsejaron para no desmayar en conseguir mis sueños.

A mi bisabuela María López, quien es el tesoro más preciado de mi infancia y que aún hoy conservo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, primeramente, por lograr culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres por apoyarme siempre y brindarme todo lo necesario a pesar de las dificultades.

A todos mis maestros que durante la carrera me compartieron y transmitieron sus conocimientos con el fin de ser un buen profesional.

A mi tutor M.Sc. Lener Sequeira Gómez, por su apoyo incondicional y desinteresado con el fin de poder realizar mi trabajo monográfico. Agradezco su disposición, dedicación a enseñarme, compromiso y tiempo para con este trabajo.

A mis asesores, el PhD. Carlos Rubí (Asesor Geológico) y M.Sc. Karen Acevedo Mena (Asesor metodológico), por su tiempo brindado, por sus comentarios, observación y correcciones.

A la M.Sc. Gema Velásquez, por brindarme su ayuda cuando se lo solicite, por sus comentarios, recomendaciones y correcciones en mi trabajo monográfico. Así mismo, a la Ing. Maryorie Toruño por tomarse un tiempo en revisar mi trabajo y brindarme comentarios constructivos para la investigación. Agradezco también, a mi buen amigo el Ing. Erick Obando por su apoyo incondicional y ayuda brindada a lo largo de este trabajo y a mi amiga Ing. Andrea Benavides por su disposición en ayudarme en campo.

CARTA AVAL

Managua, 15 de Diciembre 2020

MSc. Elim Campos

Director

Departamento de Tecnología

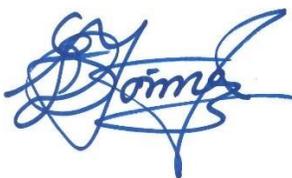
Presente

Estimado MSc. Campos:

A través de la presente someto a su consideración incluir en agenda para predefensa de tesis elaborado por la bachillera **Érika Sánchez Alemán** de la carrera de Ingeniería Geológica. Dicho trabajo se titula: **“Modelo conceptual de flujo de agua subterránea de la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua”**, el cual está bajo mi tutoría. Adjunto documento.

Sin más a que referirme, me despido deseándole éxito en sus funciones.

Atentamente,



Lener De Jesús Sequeira Gómez

M.Sc. Geofísico – Hidrogeólogo
Docente en la Facultad de Ciencias e Ingenierías

C. c. Archivo

RESUMEN

Los estudios hidrogeológicos son de importancia para el manejo, aprovechamiento sostenible, protección y conservación de los acuíferos que conforman las cuencas hidrográficas de una nación. En Nicaragua, particularmente para el área del Pacífico donde se encuentran los principales acuíferos de esta región, se cuenta con información de estudios hidrogeológicos desde 1990 aproximadamente, entre ellos los más destacados, por contener datos más completos, son los elaborados por:

- JICA & INAA en 1993, que realizaron una evaluación de las aguas subterráneas para varios municipios del departamento de Managua, donde geográficamente se sitúa el área de estudio.
- Krásný & Hecht en 1998, quienes presenta información de manera regional sobre el estado y dinámica de los recursos subterráneos del país.
- Cruz, O. (1997), quien elaboró un modelo matemático del acuífero de Managua para evaluar el rendimiento sostenible del mismo.

La presente investigación abarca un área delimitada de 179.21 km² aproximadamente, perteneciente a la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, la cual se encuentra inserta en la cuenca regional Río San Juan. Geográficamente, conforma la parte central del municipio de Managua y una mínima parte en el Norte del municipio El Crucero, cubriendo las hojas topográficas entre Managua (2952-III) y Nindirí (2952-II).

Para este trabajo investigativo se tomó como fuente primordial la recopilación de información geológica, hidráulica, hidrogeología e hidroquímica del área, lo cual permitió establecer un modelo hidrogeológico para el área de estudio. No obstante, la aplicación del método electromagnético, en campo, de exploración geofísica para aguas subterráneas, permitió fundamentar los datos obtenidos para dicho modelo.

Mediante la correlación de los diferentes paquetes litológicos encontrados en cada uno de los pozos ubicados dentro del área delimitada, sean de origen: lacustres o aluviales, piroclásticos de caída, de flujos y lavas, se presentan 5 características de depósitos respecto a la distinción de estos materiales, los cuales conforman las

principales unidades hidrogeológicas por las que se mueve el flujo subterráneo dentro de la Subcuenca II. Así mismo, se reconocen las profundidades y la dirección en que se dan estos flujos.

Finalmente, a través de la caracterización de las unidades hidrogeológicas, la identificación de los flujos subterráneos y de la información hidrogeológica encontrada en estudios previos realizados, se logró diseñar un modelo hidrogeológico 3D, en el cual se muestra una representación de la disposición en que se pueden encontrar estas unidades hidrogeológicas y la manera en que se dan los flujos subterráneos dentro de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua.

Palabras claves: hidrogeología, unidades hidrogeológicas, modelo hidrogeológico, flujos de agua subterránea, geofísica, método electromagnético y geología.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| <i>CAPÍTULO I</i> | 1 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN | 5 |
| 1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN | 7 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 7 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 7 |
| <i>CAPÍTULO II</i> | 8 |
| 2.1. MARCO REFERENCIAL | 8 |
| 2.1.1. Antecedentes | 8 |
| 2.1.2. Localización del área de estudio..... | 12 |
| Ubicación departamental-municipal | 12 |
| Ubicación hidrográfica de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua | 13 |
| Vías de acceso | 14 |
| 2.1.3. Generalidades del área de estudio..... | 16 |
| Drenaje..... | 16 |
| Uso de suelos | 16 |
| Economía..... | 16 |
| Topografía | 16 |
| Clima | 17 |
| 2.2. MARCO TEÓRICO..... | 18 |
| 2.2.1. Tectónica de América Central | 18 |
| 2.2.2. Tectónica de Nicaragua | 21 |
| 2.2.3. Geología regional de Nicaragua | 23 |
| Provincia de la Depresión de Nicaragua. | 24 |
| 2.2.4. Geología estructural de Managua | 27 |
| 2.2.5. Geología de Managua | 31 |
| Formación Las Sierras..... | 32 |
| Formación Chiltepe | 33 |
| Formación Managua | 36 |
| Formación Nejapa | 42 |
| 2.2.6. Geomorfología de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua..... | 50 |

| | |
|---|----|
| 2.2.7. Hidrología de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua..... | 54 |
| 2.2.8. Hidrogeología de la Cuenca Sur del lago de Managua | 56 |
| 2.2.9. Hidroquímica de la Cuenca Sur de Managua..... | 64 |
| 2.3. MARCO LEGAL..... | 67 |
| 2.3.1. Ley del agua..... | 67 |
| 2.4. MARCO CONCEPTUAL..... | 68 |
| 2.4.1. Hidrogeología..... | 68 |
| 2.4.2. Agua subterránea..... | 68 |
| 2.4.3. Acuíferos..... | 68 |
| 2.4.4. Tipos de acuíferos..... | 69 |
| Según las características litológicas o tipo de huecos. | 69 |
| Según las presiones hidrostáticas..... | 70 |
| 2.4.5. Modelo de un acuífero..... | 71 |
| 2.4.6. Modelo conceptual hidrogeológico..... | 71 |
| 2.4.7. Sistema de flujo subterráneo..... | 72 |
| 2.4.8. La geofísica en la prospección de agua subterránea..... | 73 |
| 2.4.9. Métodos electromagnéticos (EM) | 74 |
| Atenuación del campo electromagnético y profundidad de penetración..... | 76 |
| El Método Electromagnético en el Dominio de la Frecuencia (FDEM)..... | 77 |
| Esquema teórico del funcionamiento del FDEM | 77 |
| 2.5. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN | 79 |
| <i>CAPÍTULO III</i> | 80 |
| 3.1. DISEÑO METODOLÓGICO..... | 80 |
| 3.1.1. Tipo de estudio | 80 |
| 3.1.2. Universo y muestra | 80 |
| 3.1.3. Técnicas de recolección de datos | 80 |
| Trabajo de gabinete | 80 |
| Trabajo de campo | 81 |
| Instrumentos de campo..... | 83 |
| 3.1.4. Plan de análisis y procesamiento de datos e información..... | 84 |
| Base de datos GIS (Sistemas de información Geográfica) | 84 |
| Creación de perfiles hidrogeológicos..... | 84 |
| Interpretación de la descripción litológica de pozos | 85 |

| | |
|---|-----|
| Delimitación de unidades hidrogeológicas | 85 |
| Interpretación de datos geofísicos..... | 86 |
| CAPÍTULO IV | 90 |
| 4.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 90 |
| 4.1.1. Geología de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua..... | 90 |
| 4.1.2. Hidrogeología de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua. | 97 |
| Identificación de unidades hidrogeológicas (UHG)..... | 97 |
| Unidades hidroestratigráficas o hidrogeológicas de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua..... | 99 |
| Características hidrogeológicas de la sección A-A'..... | 100 |
| Características hidrogeológicas de la sección B-B'..... | 103 |
| Características hidrogeológicas de la sección C-C'..... | 107 |
| Características hidrogeológicas de la sección D-D'..... | 110 |
| Características hidrogeológicas de la sección E-E'..... | 112 |
| Características hidrogeológicas de la sección F-F'..... | 113 |
| Perfiles hidrogeológicos | 113 |
| Correlación de las unidades hidrogeológicas (UHG) y formaciones geológicas según sus características litológicas..... | 119 |
| 4.1.3. Flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua. | 121 |
| 4.1.4. Descripción de secciones electromagnéticas en la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua. | 124 |
| Clasificación de los rangos de valores del potencial eléctrico. | 139 |
| 4.1.5. Modelo hidrogeológico de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua..... | 142 |
| CAPÍTULO V | 145 |
| 5.1. DISCUSIÓN | 145 |
| CAPÍTULO VI | 147 |
| 6.1. CONCLUSIÓN | 147 |
| 6.2. RECOMENDACIONES..... | 151 |
| CAPÍTULO VII | 152 |
| 7.1. BIBLIOGRAFÍA..... | 152 |
| 7.2. ANEXOS..... | 157 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Mapa de ubicación del área en estudio..... | 15 |
| Figura 2. Marco Geotectónico de América Central. | 19 |
| Figura 3. Provincias fisiográficas de Centro América..... | 20 |
| Figura 4. Provincias Geológicas de Nicaragua. | 23 |
| Figura 5. Provincia de la Depresión de Nicaragua..... | 24 |
| Figura 6. Graben de Managua y sus límites estructurales. | 28 |
| Figura 7. Morfología de la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua. | 53 |
| Figura 8. Mapa del drenaje en el área de estudio..... | 55 |
| Figura 9. Tipos de acuíferos según la litología..... | 69 |
| Figura 10. Tipos de acuíferos según las presiones hidrostáticas..... | 71 |
| Figura 11. Sistemas de flujo subterráneo básico: Local, Intermedio y Regional. .. | 73 |
| Figura 12. Esquema general del campo electromagnético (Reynolds, J., 1997). . | 78 |
| Figura 13. Esquema de medición de la separación de electrodos MN. | 82 |
| Figura 14. GPS y Cinta de medición de 100 m. | 83 |
| Figura 15. Instrumento de prospección geofísica de la serie PQWT-TC. | 83 |
| Figura 16. Gráfico de curva y mapas procesados de los perfiles EM. | 87 |
| Figura 17. Mapa de ubicación de perfiles hidrogeológicos, electromagnéticos y pozos con litología. | 89 |
| Figura 18. Mapa geológico del área de estudio. | 92 |
| Figura 19. Perfiles geológicos Sección A-A' y Sección B-B'..... | 93 |
| Figura 20. Perfiles geológicos Secciones C-C' y Sección D-D'..... | 94 |
| Figura 21. Secuencia estratigráfica para el área de Managua..... | 96 |
| Figura 22. Permeabilidad por grupo de textura de suelos..... | 97 |
| Figura 23. Correlación de litología de pozos-perfil 1..... | 102 |
| Figura 24. Correlación de litología de pozos-perfil 2..... | 106 |
| Figura 25. Correlación de litología de pozos-perfil 3..... | 109 |
| Figura 26. Correlación de litología de pozos-Perfil 4..... | 111 |
| Figura 27. Correlación de litología de pozos – perfil 5..... | 115 |
| Figura 28. Perfiles hidrogeológicos - Sección A-A' y Sección B-B'. | 116 |

| | |
|---|-----|
| Figura 29. Perfiles hidrogeológicos - Sección C-C' y Sección D-D'..... | 117 |
| Figura 30. Perfiles hidrogeológicos-Sección E-E' y Sección F-F'..... | 118 |
| Figura 31. Mapa de profundidad de flujos..... | 123 |
| Figura 32. PEM1. Los Martínez..... | 125 |
| Figura 33. PEM2. MITRAB..... | 126 |
| Figura 34. PEM3. Bo. Los Pescadores | 127 |
| Figura 35. PEM4 Y PEM5. Bo. Selim Shible | 128 |
| Figura 36. PEM6. Poder Judicial (Carretera Norte)..... | 129 |
| Figura 37. PEM7. Colonia Molina..... | 130 |
| Figura 38. PEM8. Colegio República Villa Venezuela..... | 131 |
| Figura 39. PME9. Polideportivo España | 132 |
| Figura 40. PEM10. Rotonda El Periodista..... | 133 |
| Figura 41. PEM11. Bo. Camilo Ortega..... | 134 |
| Figura 42. PEM12. Villa Foresta Sur..... | 135 |
| Figura 43. PEM15. Lomas de Santo Domingo..... | 136 |
| Figura 44. PEM13. Pochocuape – Las Mercedes..... | 137 |
| Figura 45. PEM14. Intermezzo del Bosque..... | 138 |
| Figura 46. Rangos de potencial eléctrico A-A'EM..... | 139 |
| Figura 47. Rango de valores de la sección B-B'EM y C-C'EM..... | 140 |
| Figura 48. Rango de valores para la sección D-D'EM | 141 |
| Figura 49. Modelo del sistema de flujo en una cuenca regional..... | 143 |
| Figura 50. Modelo Hidrogeológico. | 144 |
| Figura 51. Mapa geológico del campo volcánico Nejapa..... | 157 |
| Figura 52. Mapa geológico de Managua y sus alrededores..... | 158 |
| Figura 53. Subsistemas de acuíferos de la subprovincia hidrogeológica del graben de Nicaragua..... | 159 |
| Figura 54. Tabla de datos de recarga total en las estaciones del área noreste del acuífero Las Sierras..... | 160 |
| Figura 55. Mapa piezométrico de la parte oeste del acuífero Las Sierras | 161 |
| Figura 56. Descripción de pozos-sección A-A'..... | 163 |
| Figura 57. Descripción de pozos-sección B-B'..... | 163 |

| | |
|---|-----|
| Figura 58. Descripción de pozos-sección B-B'..... | 163 |
| Figura 59. Descripción de pozos-sección C-C'..... | 163 |
| Figura 60. Descripción de pozos-sección D-D'..... | 163 |
| Figura 61. Descripción de pozos-sección D-D'..... | 163 |
| Figura 62. Descripción de pozos-sección E-E'..... | 163 |
| Figura 63. Descripción de pozos-sección-E-E'..... | 163 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. División de la Cuenca Sur de Managua | 13 |
| Tabla 2. Coordenadas del sitio..... | 14 |
| Tabla 3. Parámetros Climáticos | 17 |
| Tabla 4. Rangos aproximados de pendientes en una cuenca. | 52 |
| Tabla 5. Clasificación de transmisividad. | 62 |
| Tabla 6. Registro de perfiles hidrogeológicos. | 84 |
| Tabla 7. Levantamiento de perfiles electromagnéticos (EM) | 88 |
| Tabla 8. Perfiles geológicos de correlación..... | 91 |
| Tabla 9. Permeabilidad de las rocas volcánicas | 98 |
| Tabla 10. Sección A-A' | 100 |
| Tabla 11. Sección B-B' | 103 |
| Tabla 12. Sección C-C'..... | 108 |
| Tabla 13. Sección D-D' | 110 |
| Tabla 14. Sección E-E' | 112 |
| Tabla 15. Correlación de las UHG y las formaciones geológicas..... | 119 |
| Tabla 16. Correlación de las UHG y las formaciones geológicas..... | 120 |
| Tabla 17. Sección A-A'EM | 124 |
| Tabla 18. Sección B-B'EM | 130 |
| Tabla 19. Sección C-C'EM..... | 134 |
| Tabla 20. Sección D-D'EM..... | 137 |
| Tabla 21. Inventario de pozos para el área de Managua | 162 |

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

CAPÍTULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

Nicaragua es uno de los países más ricos en cuanto a recurso hídricos se trata, sin embargo, a lo largo del tiempo ha existido un problema de administración y preservación en los acuíferos y cuencas hidrográficas del territorio nacional, es por ello que se realizan trabajos investigativos hidrogeológicos, que aporten información del estado y dinámica de las aguas subterráneas que se desarrollan en el subsuelo de estas cuencas.

Sequeira (2011) afirma que:

El agua subterránea es un recurso natural renovable, aprovechado por el hombre. Su utilización es muy beneficiosa y contribuye a satisfacer las demandas creadas por él y a mejorar su bienestar social, económico y cultural. La escasez de agua amenaza el bienestar de todos, arriesga medios de subsistencia y en ocasiones pone en peligro la vida (p.16).

Sin duda alguna, el agua constituye uno de los recursos humanos más indispensables para la vida.

El presente trabajo investigativo hidrogeológico, tiene lugar sobre la Subcuenca II perteneciente a la Cuenca Sur del lago de Managua, donde se desarrolla la mayor economía nacional, y que a su vez presenta índices de crecimiento poblacional elevados. De acuerdo a su entorno geológico estructural, dicha subcuenca se encuentra dentro de un graben con tendencia NS de tipo extensional y activa, que disloca la cordillera volcánica en sentido derecho por unos 13 km (Frischbutter, 1998).

Puntualmente, esta investigación es de tipo descriptiva con un enfoque mixto, ya que se toman en cuenta ciertos valores cuantitativos. El objetivo principal de este trabajo es definir para el área de la Subcuenca II, un modelo hidrogeológico conceptual que represente las unidades hidroestratigráficas del área, así como, los tipos de flujos que ocurren en ella (sean locales, intermedios o regionales), con el único propósito de contribuir al análisis y evaluación de la disponibilidad hídrica en el sistema. Por lo cual, ha sido necesario utilizar métodos de exploración geofísica,

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

métodos hidrogeológicos, geológicos e hidroquímicos, estos últimos sobre una base bibliográfica de estudios presentes en el área de investigación.

Para concluir, la utilización de los métodos antes mencionados ha permitido caracterizar 5 unidades hidroestratigráficas para el área de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua. Así mismo, se han podido identificar los tres tipos de flujo hidrogeológicos en el área, y finalmente, mediante la aplicación del método electromagnético de exploración geofísica para la búsqueda de agua subterránea, se ha logrado clasificar tres rangos de potencial eléctrico en las rocas con valores variables, característicos según la ubicación topográfica a lo largo de la subcuenca.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua puede ser un recurso renovable cuando se controla cuidadosamente (en uso, tratamiento, liberación y circulación). En Nicaragua gran parte del agua superficial está contaminada, y por ello no se destina para suministro de agua potable. No obstante, es uno de los países más pobres del hemisferio occidental y con altas tasas de crecimiento poblacional de América Latina, lo que conlleva a una distribución inapropiada de los servicios de agua (USACE, 2001).

USACE (2001), afirma que:

Debido a la lluvia y a los abundantes recursos de agua del país, se puede decir que existe suficiente cantidad de agua para cumplir con las demandas, pero lo que no existe es la administración apropiada para desarrollar y mantener los requerimientos de suministro del recurso (p. 1).

Por lo antes expresado, la ciudad de Managua, capital de Nicaragua, donde se desarrolla gran parte de la economía del país y la cual se encuentra asentada dentro de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, se ha convertido en un área de interés por la problemática de escases de agua, provocado por el rápido crecimiento poblacional.

La explotación del agua subterránea en la ciudad de Managua dio inicio en los años 70. Para 1972, el 60% del abastecimiento de Managua provenía de la laguna de Asososca. Para los años 80 incrementó la explotación de pozos y por estudios recientes se ha llegado a suponer que dicha subcuenca se encuentra “sobre explotada” (Martínez, R., 2005). No obstante, de acuerdo a ENACAL (2000), aproximadamente el 73 % del suministro de agua que abastece la capital, proviene de fuentes subterráneas. En cambio, USAID (2000), indica que el 90% proviene de fuentes subterráneas.

Un informe del JICA (1993), divide en tres sub-áreas la cuenca Sur del lago de Managua, y plantea que la subcuenca hidrogeológica central pertenece al área donde el uso del agua subterránea debe regularse porque se presume existe sobre explotación.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Para Martínez R., (2005, p.12), “la sobre explotación de la cuenca central del acuífero de Managua aun no es evidente puesto que no hay inversión del flujo de agua desde el lago hacia el acuífero”. Así mismo afirma que “sí existe una extracción sin control, y la creciente urbanización está impermeabilizando áreas de recarga del acuífero, disminuyendo en alto grado las posibilidades de infiltración”.

Por lo tanto, el problema se formula de la siguiente manera: ¿La inapropiada preservación, distribución y administración, en la extracción de agua subterránea dentro de la Subcuenca II de la Cuenca Sur del lago de Managua, representa un gran riesgo de contaminación por inversión de flujo de agua subterránea del lago de Managua hacia el acuífero y por factores superficiales que intervienen?

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Por el estado de vulnerabilidad hidrogeológica en que se encuentran los acuíferos de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, surge el interés de generar un modelo conceptual que permita brindar información de las unidades litológicas en profundidad y especialmente las que están supra-yaciendo a las formaciones acuíferas, así como su dinámica, para un uso sostenible y una protección efectiva del recurso hídrico subterráneo en términos de cantidad y calidad.

Por lo tanto, considerando la contaminación a la que pueden estar sometidas las aguas superficiales, se confía seriamente en el agua subterránea para el suministro potable principalmente. Un programa a gran escala para la explotación de agua subterránea, sobre todo en las áreas que tienen los mejores acuíferos de la subcuenca, aumentaría la cantidad de agua potable disponible para el suministro a la capital y su entorno.

La Ley General del Agua; en sus artículos 1 y 2 establece un marco jurídico institucional para la conservación, desarrollo, uso, aprovechamiento sostenible, equitativo y de preservación en cantidad y calidad de todos los recursos hídricos, existentes en el país, sean estos superficiales o subterráneos, así como residuales o de otra naturaleza, y que a su vez se garantice la protección de los demás recursos naturales, el ecosistema y el ambiente. Además de ordenar y regular la gestión integrada de los recursos hídricos a partir de las cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas e hidrogeológicas del territorio nacional (ANA, 2010, p.10).

Por lo anterior, y porque las mejores áreas para la exploración del agua subterránea, según USACE (2001, p.48.), la constituyen los acuíferos aluviales localizados a lo largo de la costa Sur del lago de Managua y zonas dispersas a lo largo de la costa del Pacífico; es de importancia local para el desarrollo, uso sostenible, conservación y preservación de las aguas subterráneas, la elaboración de un modelo conceptual de flujo de aguas subterráneas para este sector de la Cuenca Sur del lago de Managua.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Actualmente, en la referida subcuenca no se cuenta con un modelo conceptual hidrogeológico que aplique métodos de investigación geológica, hidrogeológica, hidroquímicas y geofísicas, que permita visualizar las representaciones en dos o tres dimensiones la geometría de los acuíferos, los límites de las unidades hidrogeológicas y las direcciones del flujo subterráneo. No obstante, si se cuenta con datos físicos – químicos e isótopos ambientales como el Tritio (^3H) y Deuterio (^2H) de los cuales se puede sustentar un modelo conceptual de flujo de agua subterránea.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Definir el modelo conceptual de flujo de aguas subterráneas para la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua a través de métodos de investigación geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos y geofísicos.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Determinar los tipos de flujos de agua subterránea (regional, intermedio, local), que ocurren en la Subcuenca II de la Cuenca Sur del lago de Managua a través de métodos hidroquímicos.
2. Establecer secuencia de estratos permeables y no permeables en profundidad a través de métodos geofísicos.
3. Construir perfiles hidrogeológicos a lo largo de la Subcuenca II de la Cuenca Sur del lago de Managua a través de interpretación litológica que definan las formaciones acuíferas.
4. Establecer el modelo conceptual de flujo de agua subterránea de la Subcuenca II de la Cuenca Sur del lago de Managua.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

CAPÍTULO II

2.1. MARCO REFERENCIAL

2.1.1. Antecedentes

Las diferentes investigaciones expuestas a continuación dan un aporte significativo para correlacionar, describir, inferir y a su vez tomar como base los resultados obtenidos de cada uno de ellos para contextualizar el área de estudio y establecer el modelo conceptual de flujo de agua subterránea para la Subcuenca II de la Cuenca Sur del lago de Managua. Un insumo importante es la realización reciente de la tesis “Caracterización Hidrogeológica de la parte Noreste del acuífero Las Sierras”, de manera que fundamenta la elaboración de dicho modelo ayudando a la evaluación de la disponibilidad hídrica en un proceso dinámico ambiental.

Martínez, D. y Chevez R. M. (2017), realizaron una caracterización hidrogeológica de la parte Noreste del acuífero Las Sierras, a través de un monitoreo en 6 pozos dentro de esta área de estudio; los cuales les permitió estimar el potencial hídrico, las direcciones del flujo de agua subterránea y mediante datos piezométricos lograron reconocer una sobreexplotación al acuífero en la parte Norte.

Los métodos utilizados para la caracterización del acuífero Las Sierras consistieron en: recopilación de información previa de las características físicas del área, aplicación de método de Hantush y fórmula de Jacob para determinar la transmisividad del acuífero, elaboración de polígonos Thiessen para conocer las precipitaciones de la zona, así mismo, realizaron un balance hídrico de suelo con el fin de cuantificar la recarga local del acuífero. Los resultados obtenidos en este trabajo, ayudarán a conocer las características del acuífero Las Sierras, para establecer el modelo conceptual hidrogeológico propuesto para el área en estudio.

Velásquez et al. (2015), elaboraron en conjunto un trabajo de zonificación morfoestructónica-volcánica en el análisis morfoestructural del relieve para el municipio de Managua, Nicaragua. En el cual lograron establecer doce zonas o unidades morfoestructónicas-volcánicas de acuerdo a las condiciones geológicas y

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

geomorfológicas del área, de las cuales seis de ellas forman parte de la subcuenca en estudio.

La realización del análisis morfoestructural se llevó a cabo mediante la aplicación del enfoque estructural-geomorfológico del relieve y la aplicación de métodos del análisis morfoestructural (orientación estructural del relieve, evaluación morfométrica, identificación e interpretación de rasgos estructural-geológicos, entre otros). Con este trabajo se pretende conocer detalles de rasgos estructurales, geomorfológicos para correlacionar y definir el modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II.

Martínez, M. (2012), realizó un análisis morfoestructural del graben de Managua y sus alrededores. Este estudio está basado en un análisis estructural de los diferentes indicadores cinemáticos y arreglos geométricos encontrados en la zona, en el cual determinó que las fallas geológicas que se encuentran en el área de Managua poseen una geometría en échelon bien definida con una componente lateral y además presenta zonas de relevo de longitudes variables. Así mismo, logro identificar que la dinámica de estas fallas se representa por movimientos verticales y otras por movimientos laterales, aunque en ocasiones se presenta una combinación de los dos movimientos.

La metodología que se utilizó para llevar a cabo el análisis morfoestructural del graben de Managua, fue a través de: análisis e interpretación de características estructurales e indicadores cinemáticos, interpretación de fotografías aéreas, mapas (topográfico, altimétrico, de pendientes, modelo de sombreado) del área. Este análisis estructural fortalece la interpretación para conocer el comportamiento de las fallas ubicadas dentro del graben donde geoestructuralmente se encuentra la Subcuenca II de la Cuenca Sur de Managua.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

NETER (2009), elaboró un mapa piezométrico del acuífero Las Sierras, dicho mapa fue elaborado por medio de la red de vigilancia piezométrica nacional de INETER, en él se representa la hidrodinámica del acuífero Las Sierras a escala 1: 100,000. Los datos correspondientes a la publicación de este mapa, contribuirá al análisis para determinar los tipos de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II y lograr establecer el modelo conceptual propuesto en esta investigación.

Martínez, R. (2005), realizó un balance de la subcuenca central del acuífero de Managua utilizando el Software Flowpath II, donde tomo en cuenta datos de conductividad hidráulica, transmisibilidad para la realización de un modelo conceptual que reflejan la dirección de flujos dentro de la subcuenca central. Los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan una base del conocimiento de la dinámica de los flujos y la disponibilidad del recurso hídrico dentro de la Subcuenca II de la Cuenca Sur del lago de Managua.

INETER (2002), ejecutó un proyecto para la Actualización del Mapa de Fallas Geológicas de Managua, en el cual se establecieron las localizaciones y prolongaciones de las fallas geológicas, especialmente en el área Sur de Managua, las cuales fueron determinadas con ayuda de recopilación de estudios geológicos y geofísicos que se ejecutaron en las últimas décadas en la ciudad de Managua. La información expuesta en este trabajo sirve como base estructural de las fallas encontradas dentro de la subcuenca en estudio.

Krázný y López (1988), llevaron a cabo un estudio con el propósito de explorar las fuentes de agua subterránea para el abastecimiento de la ciudad de Managua. Posteriormente Krázný y Hecht (1998), propusieron tres provincias hidrogeológicas de Nicaragua: Pacífico, Central y Atlántico. Estas provincias fueron definidas de acuerdo a la dirección del flujo de agua y las propiedades geológicas. Los autores se enfocaron en la región Pacífica de Nicaragua, para la cual presentaron un mapa hidrogeológico y un mapa hidroquímico. Los datos hidroquímicos e hidrogeológicos aportados en estos mapas forman parte de la información requerida para comprender y determinar los tipos de flujos subterráneos en el área de estudio.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Cruz, O. (1997), realizó un estudio donde evaluó el rendimiento sostenible del acuífero de Managua, esto con el fin de estimar la disponibilidad y/o sobreexplotación del agua subterránea, el riesgo de contaminación y definir así zonas de protección para pozos de abastecimiento público. Para el desarrollo de esta investigación el autor utilizó como herramienta de modelaje de agua subterránea, el programa de simulación de flujo bidimensional estado constante FLOWPATH 5.2 (Guiguer y Franz, 1994), el cual permite simular grandes extracciones de agua a largo plazo y los efectos en el comportamiento hidrodinámico del mismo.

Estimando así, cargas hidráulicas, abatimientos por extracción, líneas de flujo, velocidades, zonas de capturas de pozos y balance hídrico del sistema. Dicho estudio hidrogeológico presenta resultados muy importantes a tomar en cuenta para establecer el modelo hidrogeológico conceptual propuesto en este trabajo monográfico. Por lo cual, la información presente en él, constituye una base significativa en la caracterización de las unidades hidrogeológicas para la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua.

JICA & INAA (1993), ejecutaron un proyecto en la cuenca “Sur del lago de Managua” cubriendo las municipalidades de Ciudad Sandino, Managua, Tipitapa, Nindirí y Masaya. El proyecto consistió en calcular el potencial del agua subterránea y formular un plan de desarrollo para el suministro de abastecimiento de agua en la ciudad de Managua. Para esto dividieron el área de estudio en tres sub – áreas hidrológicas e hidrogeológicas: Occidental, Central y Oriental; dando como resultado la creación de un mapa hidrogeológico para la ciudad de Managua. Este estudio representa hasta la fecha uno de los más completos que han sido realizados en la zona.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.1.2. Localización del área de estudio

Ubicación departamental-municipal

La República de Nicaragua administrativamente comprende 15 departamentos y 2 regiones autónomas, cada una de estas divisiones está compuesta de uno o varios municipios, sumando en total 153 de estas entidades en todo el país (INETER, 2016. Ley N°59, “Ley de División Política Administrativa y sus Reformas”). Puntualmente, la Subcuenca II se localiza en el departamento de Managua, el cual se ubica en las coordenadas 12°9'0" N, 86°16'0" W, con una superficie aproximada de 3,465.1 km², y cuenta con una población de 1,374,025 habitantes, donde la población urbana representa un 90% y la rural ocupa un 10% (CENAGRO, 2011, p.11).

Administrativamente el departamento de Managua está conformado por nueve municipios (San Francisco Libre, Ciudad Sandino, El Crucero, Tipitapa, Managua, San Rafael del Sur, Villa El Carmen, Mateare y Ticuantepe), siendo el municipio de Managua la cabecera del departamento y capital de la República de Nicaragua. Geográficamente el área en estudio está dentro de los límites del municipio de Managua y cubre una pequeña parte en el Norte al municipio de El Crucero. El municipio de Managua se ubica entre los meridianos 86° y 40' y 86° 16' de longitud Oeste y los paralelos 12° 7' y 110° 43' de latitud Norte, con una extensión territorial de 267 Km² y cuenta con una población estimada de 1.045.912 habitantes. Limita: al Norte con el lago Xolotlán o lago de Managua; al Sur con el municipio del Crucero, Ticuantepe y Nindirí; al Este con el municipio de Tipitapa; y al Oeste con los municipios de Ciudad Sandino y Villa Carlos Fonseca (CENAGRO, 2011, p.34).

Hidrológicamente, Managua cuenta con dos cuencas hidrográficas, formadas en el Norte y Sur del lago Xolotlán, las cuales están dentro de la cuenca regional Rio San Juan.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Ubicación hidrográfica de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua

De acuerdo con el registro de clasificación de cuencas hidrográficas de Nicaragua bajo la metodología Pfafstetter, el área de estudio pertenece a la Cuenca Sur del lago de Managua, la cual a su vez se encuentra inserto dentro de la cuenca hidrográfica Río San Juan de Nicaragua (código de unidad 952) o Cuenca 69 del Río San Juan, la cual abarca una extensión de 19, 533.46 km² (INETER et al., 2014, Figura 1).

Dicha cuenca fue descrita por JICA & INAA (1993), quienes afirman que:

“La Cuenca Sur del lago de Managua se encuentra limitada por las serranías de Mateare y de Managua en el Sureste, por la divisoria de Las Sierras de Carazo en el Sur y por la divisoria de aguas subterráneas que se alinea cerca de la carretera nacional que conecta Tipitapa y Masaya hacia el Este” (p.4-3).

Así mismo, mencionan que la referida cuenca de Managua, se encuentra dividida en cuatro sistemas de subdrenaje denominados: Subcuencas (I, II, III y IV). En la tabla 1, se ilustran las respectivas subcuencas que dividen a la Cuenca Sur del lago de Managua y el municipio en que se ubican.

Tabla 1

División de la Cuenca Sur del Lago de Managua.

| Sub-Cuencas | Porcentaje | Municipios |
|--------------|------------|--------------------------|
| I | 34.1 | Mateare y Ciudad Sandino |
| II | 25.2 | Managua y El Crucero |
| III | 17.2 | Ticuantepé |
| IV | 23.5 | Tipitapa |
| TOTAL | 100.0 | |

Fuente: FUNCOD (1996), (Tomado de Mora, 2005, p. 16).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Puntualmente, el área de estudio se define en este trabajo como “Subcuenca II, Cuenca sur del lago de Managua”, la cual abarca la parte principal de la ciudad de Managua y una pequeña porción del municipio de El crucero en su extremo Noreste, así mismo, se encuentra conformada por diferentes estructuras (estructuras de colapso, maares, cráteres volcánicos jóvenes, entre otras).

En cuanto a la referida subcuenca II, está se encuentra delimitada al Norte por la costa Sur del lago Xolotlán, al Sur con el acuífero de la Meseta de Carazo, al Este con la Subcuenca III y al Oeste con el acuífero Chiltepe - Mateare o Subcuenca Ciudad Sandino. Así mismo, se encuentra localiza entre las hojas topográficas de Managua (2952-III) y Nindirí (2952-II). El área delimitada de esta investigación cuenta con una extensión de 179.21 km² aproximadamente (Figura 1).

Vías de acceso

Las principales vías de acceso para llegar a la Ciudad de Managua son: Carretera Panamericana Sur, Carretera León-Managua, Carretera Panamericana Norte y Carretera El Crucero-Managua. A continuación, en la Tabla 2, se muestran los vértices del polígono que encierra el área de estudio.

Tabla 2

Coordenadas del sitio.

| Vértices | Coordenadas Este | Coordenadas Norte |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 572478 | 1325631 |
| 2 | 572478 | 1345597 |
| 3 | 587908 | 1345597 |
| 4 | 587908 | 1325631 |

Fuente: Unidades UTM Datum WGS84, Zona 16

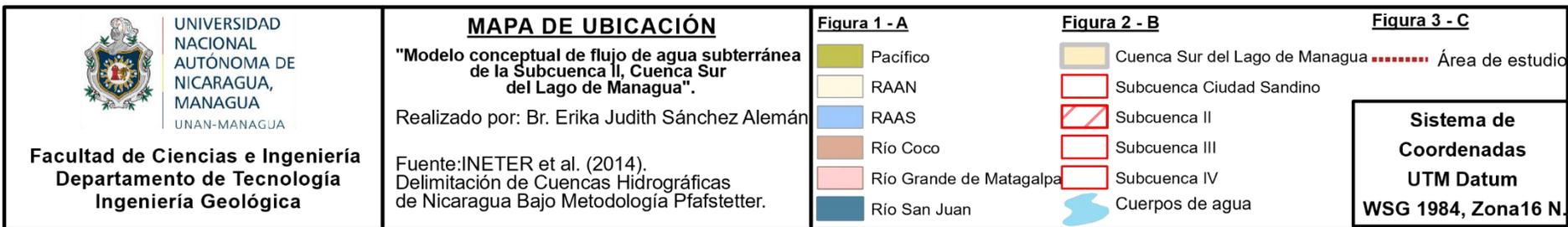
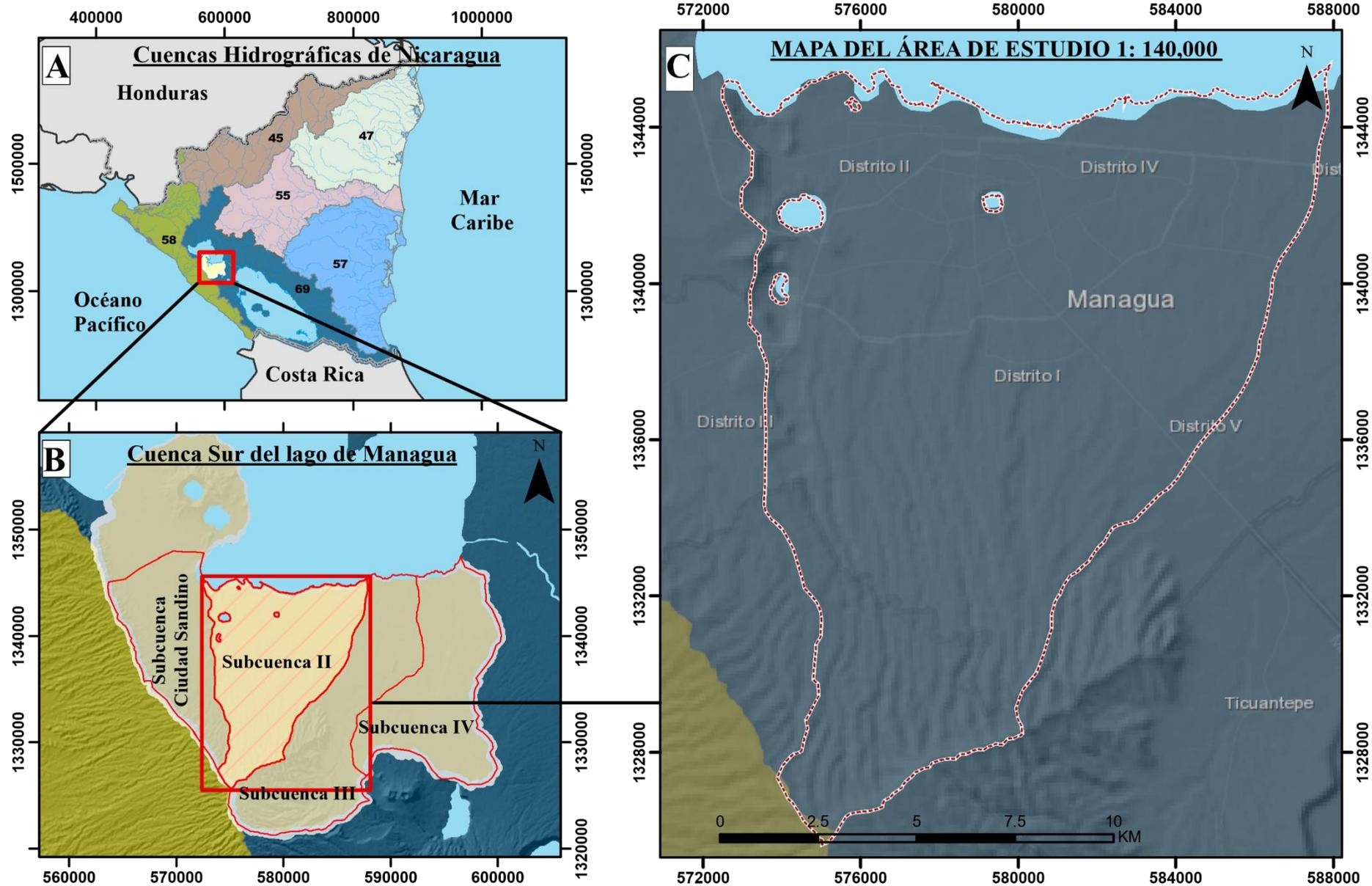


Figura 1. Mapa de ubicación del área en estudio.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.1.3. Generalidades del área de estudio

Drenaje. La Subcuenca II, no tiene cursos de aguas significativos, sólo hay presencia de corrientes efímeras de carácter estacionario de curso breve en su parte alta, mientras tanto, la parte media y baja de dicha subcuenca cuenta solamente con drenajes pluviales urbanos que en su mayoría drenan al lago de Managua.

Uso de suelos. Según un estudio realizado por MAGFOR (2013), revela que el aprovechamiento de las tierras del departamento de Managua es de 48,747.22 manzanas, para cultivos anuales o temporales representando el 5% del área nacional; para cultivos permanentes y semi permanentes 19,328.52, correspondiendo al 4% del área nacional; para pastos cultivados o sembrados representa el 4% del área nacional con 50,152.28 manzanas. El área de pastos naturales es de 81,152.28 manzanas para un 2% del área nacional.

Así mismo afirma que, “El 63 % de los suelos del departamento son de origen volcánico pertenecientes al orden de los, Molisoles, Inceptisoles y Alfisoles con propiedades físico químicas adecuadas para el desarrollo de cultivos anuales, semiperennes, perennes y pastos. El 27 % restante, corresponde a suelos del orden de los Vertisoles y Entisoles (MAGFOR, 2013, p.35).

Economía. De acuerdo con López, Y., (2015), la ciudad de Managua es el que presenta mayor actividad económica del país, la cual se basa principalmente en el comercio y la industria. Centraliza muchos servicios y a las entidades de gobierno, las principales universidades y hospitales, así como, los principales hoteles y negocios del país.

Topografía. La Subcuenca II de la Cuenca Sur del Lago de Managua, presenta una topografía inclinada hacia la costa del lago o banda norte, y una zona montañosa o de alturas que comprende: Las Sierras de Managua, las Sierritas de Santo Domingo y la península de Chiltepe.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Clima. La distribución de la temperatura media mensual en el departamento de Managua alcanza las temperaturas más altas en el centro de Managua que oscila entre los 30 °C hasta los 35 °C y 26.9 °C en los lugares más elevados, situados al Norte y Suroeste del departamento; con oscilaciones máximas anuales de 2.4 °C y 3.2 °C respectivamente (ver tabla 3). Las oscilaciones diurnas, son mayores que las oscilaciones anuales, típico de las zonas tropicales (Gutiérrez C., 2018).

Específicamente el clima de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, se caracteriza por ser de sabana tropical con una prolongada estación seca y temperaturas que oscilan entre los 27. 5° C y 28° C, hasta 32° C. La precipitación media anual varía entre los 1,000 y 1,500 mm, a excepción del municipio de El Crucero que tiene una variación de temperatura promedio de 22° C y 28° C siendo éste, uno de los pocos lugares de la costa del Pacífico en poseer estas temperaturas (CENAGRO, 2011, p.34). En la Tabla 3, se ilustran los parámetros climáticos promedio de Managua.

Tabla 3

Parámetros climáticos promedios de Managua.

| Mes | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Anual |
|---------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|
| Temp. máx. media (°C) | 27.1 | 27.8 | 35.1 | 37.0 | 27.8 | 27.8 | 27.1 | 27.0 | 26.6 | 26.2 | 26.4 | 26.2 | 28.5 |
| Precipitación total (mm) | 0.0 | 0.0 | 0.8 | 25.8 | 251.9 | 108.7 | 140.3 | 292.0 | 219.6 | 300.0 | 61.3 | 11.5 | 1411.9 |

Fuente: INIDE (2010).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Tectónica de América Central

Geotectónicamente, América Central, se encuentra localizada frente un borde convergente destructivo, producto de la subducción de la placa Coco bajo la placa Caribe, lo que permitió dar origen a la estructura denominada Fosa Centroamericana, siendo esta estructura aún más larga que América Central, alcanzando una longitud total de 2,700 km y una profundidad de 6,700 m, la cual se prolonga al Noroeste frente a México y hacia el Sureste frente a la costa Pacífica de Costa Rica, donde se hace más superficial debido a la subducción del levantamiento de la placa Coco (Denyer, 2006, Figura 2).

Centroamérica tectónicamente se encuentra limitada en su extremo Norte por la placa de Norte América, está separada de la placa Caribe por el sistema de fallas transcurrente sinistral denominado Polochic-Motagua y en su extremo Sur por la placa Nazca, separada de la Caribe por la zona de fractura de Panamá (falla transcurrente dextral), formando así un punto triple con la placa Caribe, la cual forma el límite convergente con la placa Coco en el Oeste (Figura 2). Uno de los rasgos importantes que presenta Centroamérica, es la faja volcánica cuaternario, paralela a la Fosa Centroamericana con 1,100 km de longitud, que se extiende desde el volcán Tacaná al Norte desde la frontera de México-Guatemala, hasta el complejo Irazú Turrialba en la parte central de Costa Rica.

Estructuralmente la región de Centroamérica se encuentra dividida por bloques que difieren en composición y edad de origen. La parte Norte de Centroamérica, conformada por Guatemala, Belice, Honduras, parte Norte y Occidental de Nicaragua, están constituidas por los denominados Bloque Maya y Bloque Chortis, estos separados por el sistema de fallas Polochic-Motagua. El Bloque Maya corresponde al extremo Sur de la placa de Norte América. El Bloque Chortis constituye el basamento del Precámbrico al Paleozoico de la placa Caribe en su área de corteza continental, abarcando Honduras, El Salvador, Norte y occidente de Nicaragua compuesto por rocas metamórficas de edad Paleozoica (Bundschuh y Alvarado, 2007, Figura 3).

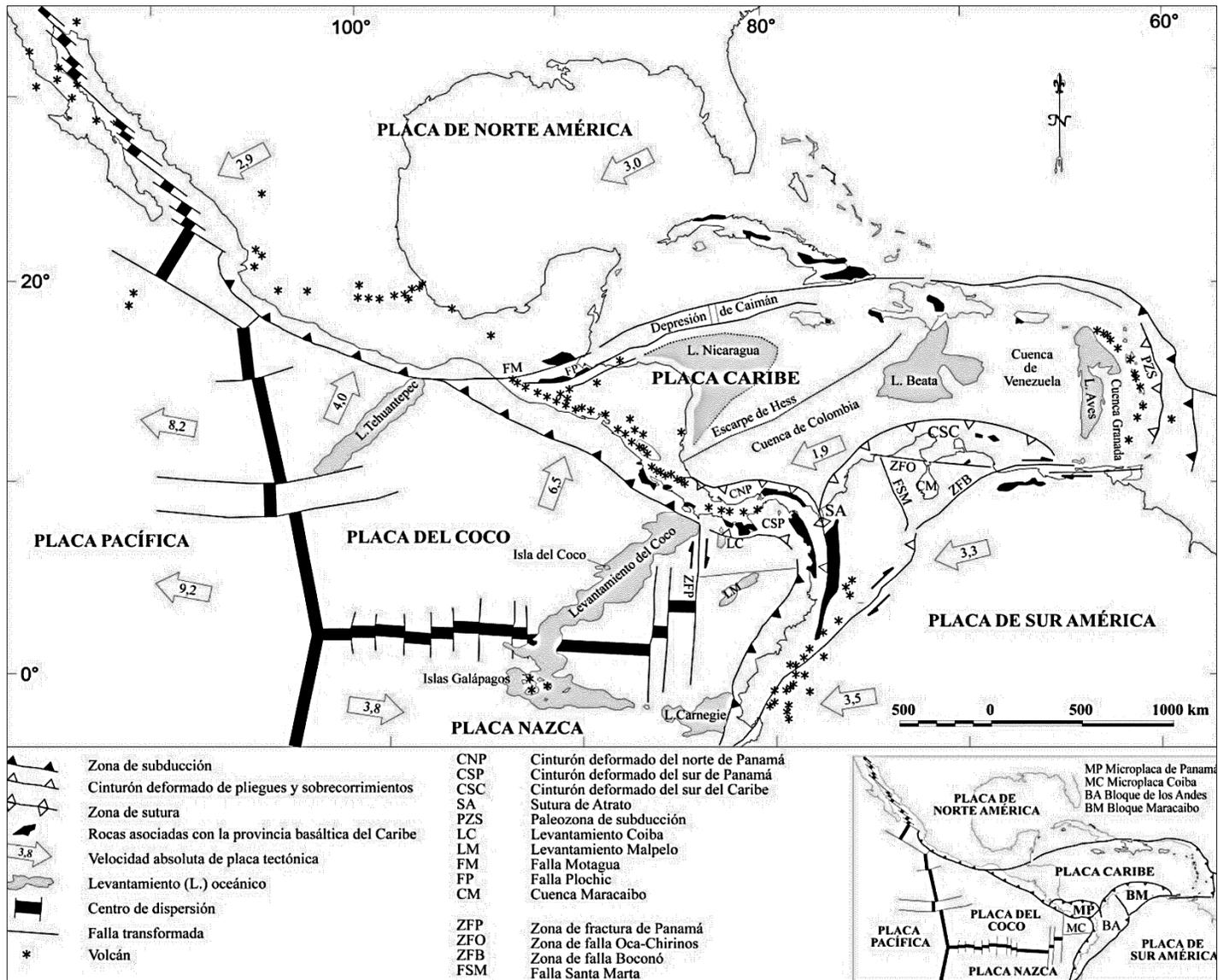


Figura 2. Marco Geotectónico de América Central.

Fuente: Case et al. (1994), Donnelly, (1994), Mann et al. (1990) y Meschede & Frisch (1998).

Tomado de Denyer, (2006).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

No obstante, Nicaragua meridional, Costa Rica y Panamá, se han clasificado por estar compuestos de un basamento de origen oceánico, los cuales hacen parte del Bloque Chorotega y Bloque Chocó. El Bloque Chorotega forma la parte sudoriental de Nicaragua, Costa Rica occidental y Panamá occidental. Mientras tanto, el Bloque Chocó, se ubica en el borde Norte de Panamá oriental, considerando que dicho bloque es un fragmento acrecionado a la placa de Sur América y el borde Suroeste de la placa Caribe (Denyer, 2006, Figura 3).

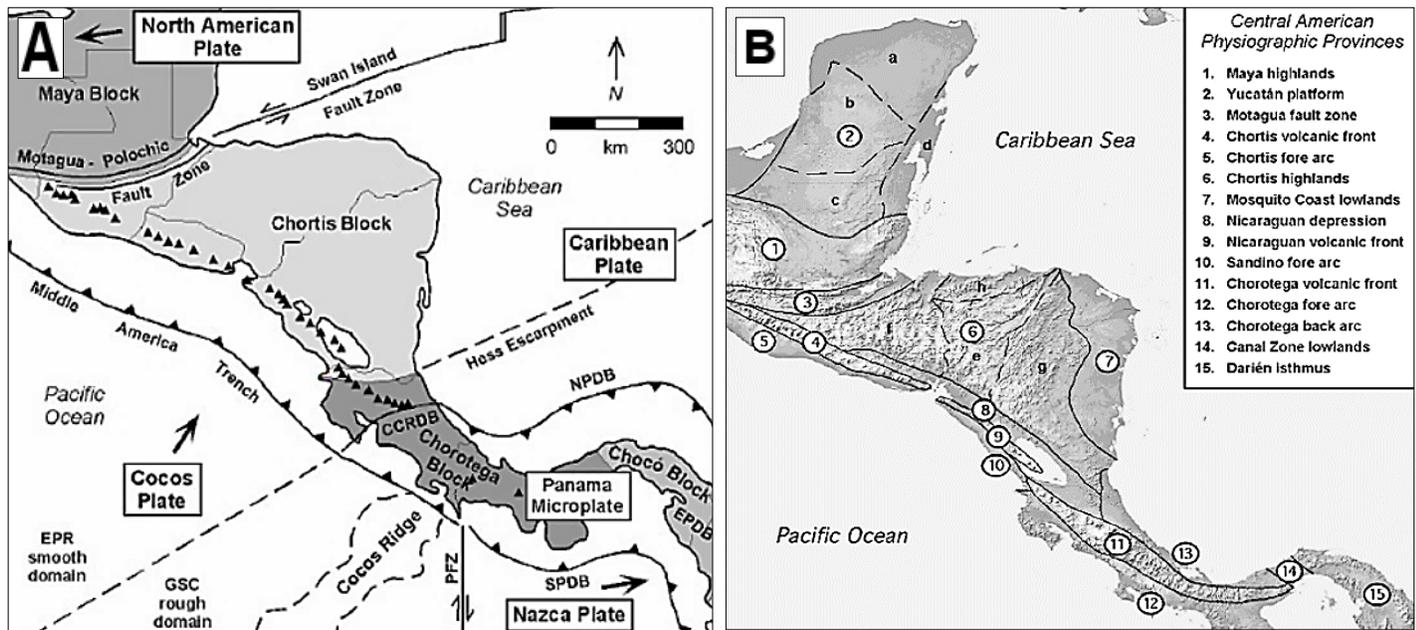


Figura 3. Provincias fisiográficas de Centro América.

Fuente: Marshall (2006).

Figura 3-A. Las áreas sombreadas indican los bloques del basamento Maya, Chortis, Chorotega, Choco, así como los límites y nombres de cada placa que conforma la región de América Central. **Figura 3-B.** Las líneas indican los límites que abarcan las provincias de cada Bloque y los números se refieren a la lista de provincias fisiográficas incluida en la misma, donde las letras representan las Subregiones en Centroamérica: a) Llanura kársticas del Norte; b) Meseta montañosa kársticas del Sur; c) Meseta y tierras bajas kársticas de Petén, d) Llanura costera del Este; e) Meseta Central de Chortis; f) Tierras altas Occidentales; g) Meseta Oriental; y h) Zonas del borde Hondureño (citado de IMC., 2010. p.6).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2.2. Tectónica de Nicaragua

Nicaragua geotectónicamente se localiza en el margen Suroeste de la placa del Caribe cerca de su intersección con la placa de Cocos. La placa de Cocos subduce a la placa Caribe hasta los ~200 km, siendo esta la profundidad máxima alcanzada por los sismos originados en esta área. Distinguiendo así dos franjas tectónicas, paralelas y cercanas a la costa; una es la cadena volcánica y la otra es la Depresión de Nicaragua (Frez y Gamez, 2008). De acuerdo con Harlow y White, (1993), se ha sugerido que el movimiento relativo entre ambas placas es ligeramente oblicuo con una componente horizontal en dirección paralela al arco de 8 mm/año (citado de Frez y Gamez, 2008). Por su parte Frischbutter, (2002), menciona que las velocidades estimadas de subducción entre la placa de Cocos y Caribe, varían de 70 a 80 mm/año.

En concordancia con DeMets, (2001), en Nicaragua, la placa de Cocos subduce hacia el Noreste a la placa Caribe, paralelo a la Fosa Mesoamericana, con un ángulo de subducción de ~65°, a una velocidad de 14 ± 2 mm/año, lo que ha provocado la formación del Arco Volcánico de América Central (AVAC); (citado de Avellán, 2009). En Nicaragua el AVAC está representado por la cadena volcánica nicaragüense, ubicada a lo largo de la región Oeste de Nicaragua.

Por la ubicación tectónica en que se encuentra Nicaragua, presenta dos basamentos, uno de origen continental y otro de origen oceánico, debido a que la región continental de la placa Caribe, está dividida en los Bloque Chortis y Bloque Chorotega, estos separados por el accidente de Hess. De acuerdo con Elming, (1998), la región Norte de Nicaragua se encuentra dentro de los márgenes del Bloque Chortis, compuesto por rocas metamórficas de edad Paleozoica; y la parte meridional está formada por el Bloque Chorotega, constituido por un basamento oceánico del Cretácico, con espesores de sedimentos marinos y volcánicos depositados durante el Terciario; los cuales se extienden al Sur de Nicaragua hasta el Norte de Panamá (citado de Avellán, 2009).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Bermúdez y Blandón, (1992), explica que un antiguo metamorfismo de grado medio a bajo, parcialmente muy deformado, probablemente de edad Paleozoica, que incluye rocas graníticas a intrusivas intermedias, están asociadas a la evolución del arco magmático de la corteza a lo largo de la frontera de Honduras-Nicaragua (citado de Frischbutter, 2002). La llanura de la costa del Caribe de Nicaragua, está conformada principalmente por depósitos del Mioceno al Cuaternario hasta el Holoceno, superpuestos a una sucesión Terciaria, sedimentaria-magmática, que se extiende al Este como la cordillera de Nicaragua bajo el mar Caribe; y encontrando dentro de las tierras altas interiores de Nicaragua extensas rocas volcánicas de edad Terciaria, que generalmente se vuelven más jóvenes de Este a Oeste y paralelas a la trinchera Mesoamericana, las cuales han sido asociadas a una etapa de vulcanismo intensivo de carácter fisural y de orientación NW-SE en la parte central de Nicaragua (Frischbutter, 2002).

Por su parte, Weinberg, (1992), subdividió la evolución Neotectónica-estructural del occidente de Nicaragua en tres etapas. Etapa 1: la compresión del Mioceno Tardío al Plioceno temprano, produce la estructura de pliegues con tendencia NW-SE de la región costera del Pacífico, estos asociados a la actividad volcánica de la edad del Mioceno al Plioceno en las tierras altas interiores de Nicaragua. Etapa 2: la deriva al NE del Bloque Chortis se relaciona con edades del Plioceno-Pleistoceno con un régimen extensional, que en consecuencia dio origen a la formación de la Depresión de Nicaragua y a su vez provocó una migración SO del cinturón volcánico (Jarrard, 1986). Etapa 3: Pleistoceno temprano hasta el presente, las formaciones estructurales que se separan, con tendencia NS, se deben al acortamiento horizontal en dicha dirección, ejemplo de ello el graben de Managua (citado de Frischbutter, 2002).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2.3. Geología regional de Nicaragua

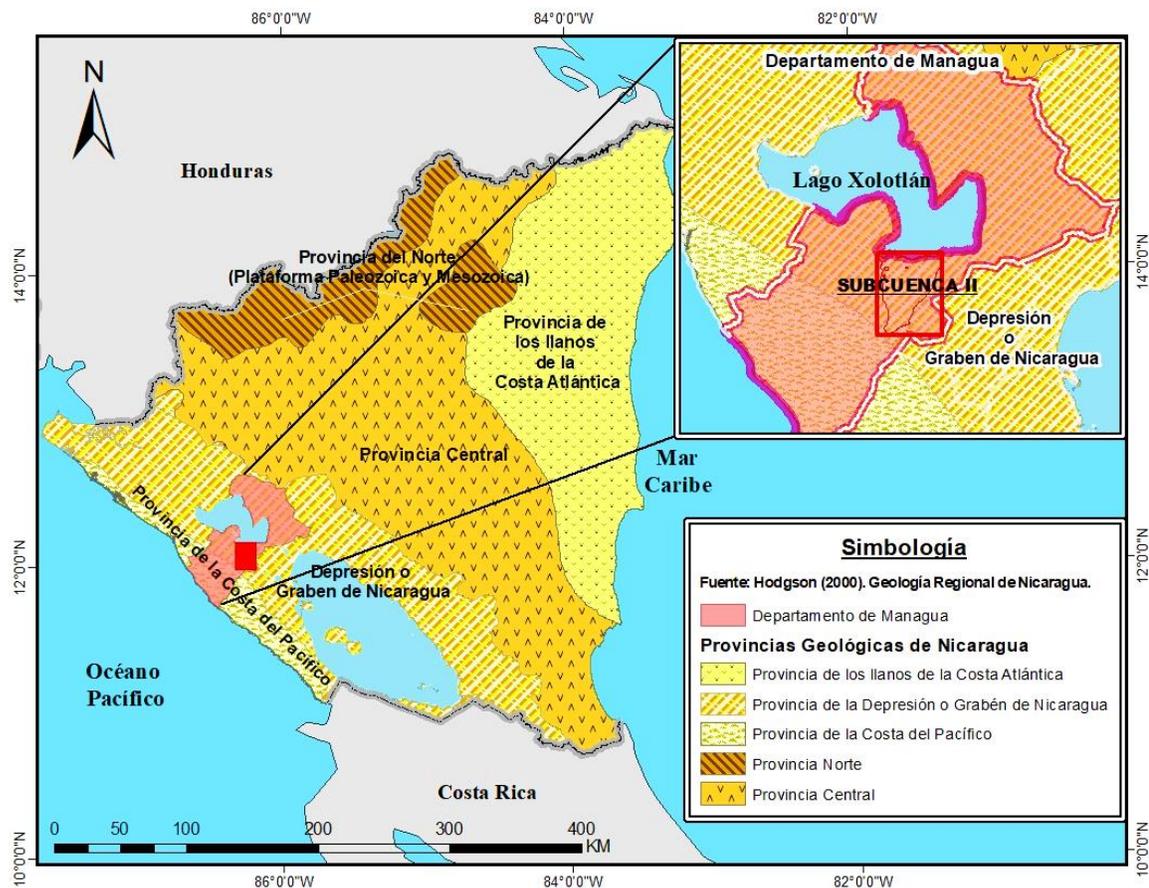


Figura 4. Provincias Geológicas de Nicaragua.

Fuente: Hodgson, G. (2000).

Nicaragua ha sido dividida en cinco provincias geológicas, establecidas y descritas por Hodgson, G., (2000). Estas provincias se encuentran marcadas principalmente por rasgos litológicos, estructurales y geomorfológicos, que las caracteriza una de otras, tales son (Figura 4):

1. Provincia de la Costa del Pacífico o Cuenca de sedimentación de la Costa del Pacífico.
2. Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica o Cuenca de sedimentación de la Costa Atlántica.
3. Provincia Central (Provincia volcánica Terciaria).
4. Provincia del Norte (Plataforma Paleozoica y Mesozoica).
5. Provincia de la Depresión de Nicaragua o Grabén de Nicaragua.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

El área de estudio donde se desarrolla este trabajo de investigación se encuentra inserto dentro de la Provincia de la Depresión de Nicaragua (Figura 4), por ello se describe a continuación la geología regional en que se sitúa.

Provincia de la Depresión de Nicaragua.

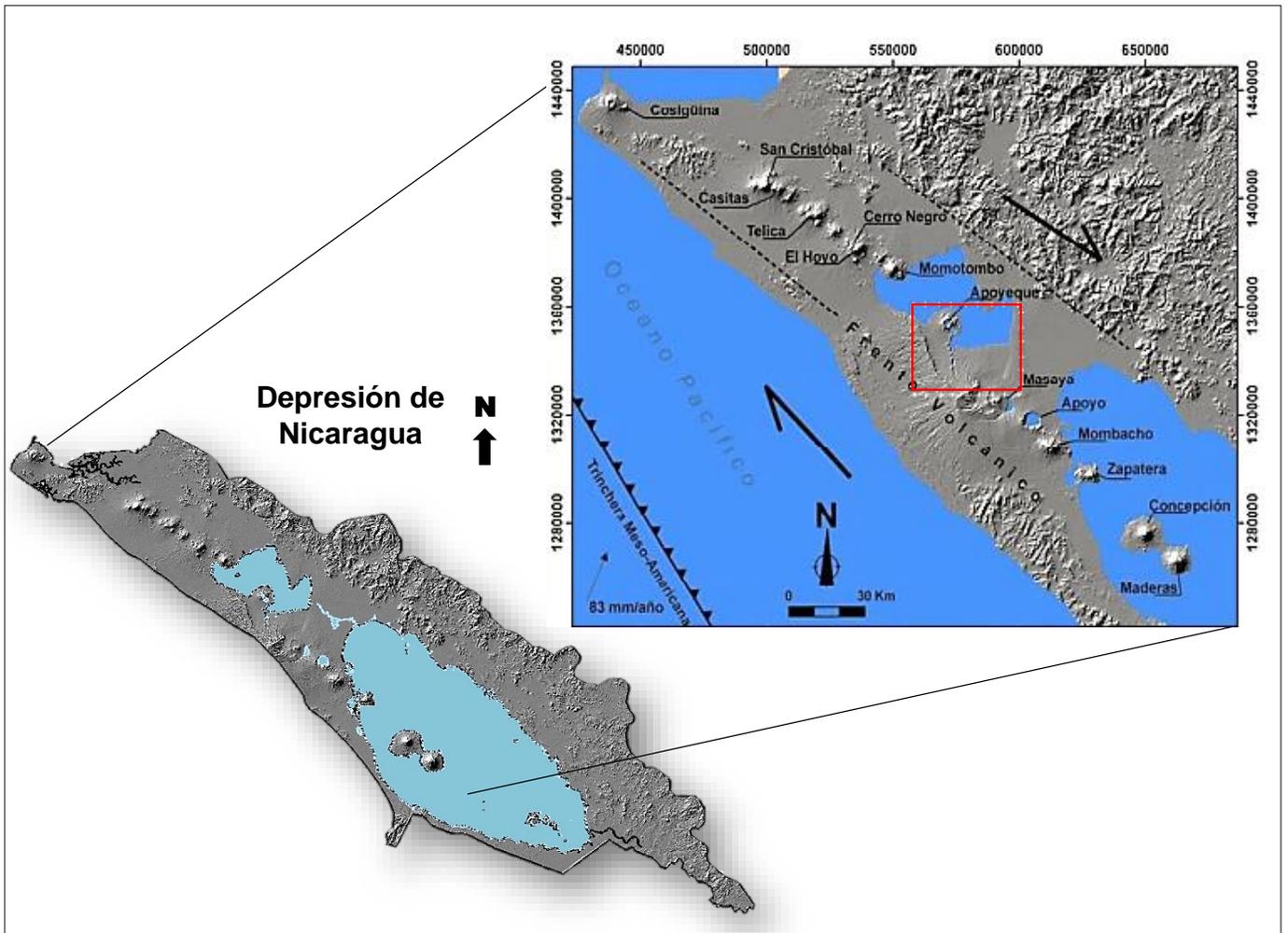


Figura 5. Provincia de la Depresión de Nicaragua.

Fuente: Avellán, (2009).

Figura 5. Morfología de la Depresión de Nicaragua, presentando en su interior el vulcanismo activo de la Cadena Volcánica Nicaragüense, que se extiende desde el volcán Cosigüina en el Norte, hasta el volcán Madera en el Sur, dentro del Lago de Nicaragua. Así mismo, se ubica el graben de Managua en recuadro rojo.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

El origen de la provincia de la Depresión de Nicaragua, es atribuida a la Interacción de las placas Cocos y Caribe, definiéndose, como una zona alargada y paralela a la Fosa Mesoamericana. De acuerdo con autores como, McBirney y Williams, (1965); Dengo, (1969); los cuales afirman que, esta depresión empezó a formarse a finales del Terciario (Mio-Plioceno) continuando hasta la actualidad, producto de los esfuerzos de tensión local que actúan en la cresta de un geoanticlinal, como consecuencia de la compresión regional que existe sobre la Fosa Mesoamericana. De igual forma, sugieren que el inicio del vulcanismo que dio origen a la cadena volcánica nicaragüense, ubicada en el extremo Noroeste y parte media de la Depresión de Nicaragua, inicio a finales del Cuaternario (Plioceno), en las porciones más estrechas del graben, extendiéndose desde el volcán Cosigüina en el Norte, hasta el volcán Madereras en el Sur de Nicaragua (citado de INETER, 2002, Figura 5). No obstante, Molnar y Sykes, (1969), explican la formación de la cadena volcánica nicaragüense, describiendo así, que el material fundido de la placa de Cocos asciende casi verticalmente penetrando la placa Caribe a lo largo de una línea casi recta y paralela a la Fosa Mesoamericana con una distancia promedio de 200 km (citado de Espinoza, 2007).

Específicamente, la Depresión de Nicaragua cuenta con una extensión longitudinal de 300 km y 70 km de ancho, extendiéndose desde el Golfo de Fonseca hasta el extremo Sureste de Nicaragua, con una dirección preferencial NW-SE, presentando en su interior la cadena volcánica activa nicaragüense, la cual comprende al menos de doce complejos volcánicos, incluido seis volcanes actualmente activos: San Cristóbal, Telica, Cerro Negro, Momotombo, Masaya, Concepción y los dos grandes lagos de Nicaragua (lago Xolotlán y lago Cocibolca). Dicha estructura regional se encuentra paralela a la zona de subducción y se caracteriza por presentar fosa de mar profunda, regiones de plataformas, cadenas de arcos de isla activos y rasgos tectónicos activos. Los principales fallamientos del graben nicaragüense ocurren paralelamente a la costa del Pacífico, por lo que se encuentran estructuras importantes como lo son las fallas de Nejapa y Tipitapa, que mantienen una orientación Norte-Sur y forman el llamado graben de Managua (Figura 5).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

De acuerdo con la litología de esta provincia, sobre ella se encuentran depósitos piroclásticos, sedimentos del Plioceno y reciente, con un predominio de rocas volcánicas, por lo cual, las rocas más características están comprendidas en la serie piroclástica de la Formación Las Sierras y el Grupo Managua, así como, flujos lávicos recientes (Hodgson, G., 2000). No obstante, dentro de la depresión se pueden encontrar ignimbritas y lavas básicas del Grupo Coyol. Todo el conjunto de roca de la depresión tiene un espesor de 900 metros aproximadamente, sin embargo, perforaciones dentro del graben señalan un espesor de 2000 m de piroclastos (Sevilla, S., 2016).

Puntualmente, esta provincia, engloba la litología de: Los depósitos del Grupo Coyol dentro del graben (área NW y NW-Central, Isla de Solentiname), Formación Tamarindo, el grupo La Sierra Superior (grupo Las Nubes), La Sierra Intermedia-Inferior (basamento sobre el cual descansa la ciudad de Managua), Cordillera Diriamba-Carazo, área de Malpaisillo-La Paz Centro, Grupo Managua, pómez de la Cordillera Mateare, depósitos de la Cordillera de los Maribios, depósitos Nejapa-Miraflores, depósitos de lavas de composición basáltica andesítica atribuidos al grupo volcánico Masaya y depósitos Cuaternarios.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2.4. Geología estructural de Managua

Geoestructuralmente, la ciudad de Managua, donde se localiza la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, se encuentra dentro de un graben producto de la subducción oblicua de la placa Coco bajo la placa Caribe (Figura 5).

De acuerdo con Carr et al. (2003), debido a la subducción ocurre una rotación en sentido de las agujas del reloj del bloque paralelo (bloque de ante-arco) a la fosa, provocando una fragmentación del AVAC (Arco Volcánico de América Central), “dicha fragmentación ha generado la formación de fallas perpendiculares laterales derechas e izquierdas” (La Femina et al., 2002), así como la fragmentación de la cadena volcánica nicaragüense y la formación del graben de Managua (citado de Velásquez et al., 2015). La segmentación de la cadena volcánica nicaragüense, está caracterizada por tener una separación ~25 km y una desviación de ~54°. Para Espinoza, (2007), dicha zona de relevo, representa una zona estructural extensional, interpretada como una cuenca “Pull-Apart” (Figura 6-B).

El graben de Managua es una estructura de tendencia NS, considerada secundaria, con las mismas características y origen de la estructura principal (Depresión de Nicaragua), siendo de tipo extensional y activa, que disloca la cordillera volcánica en sentido derecho por unos 13 km (discutido por Frischbutter, 1998). Dicho graben se encuentra limitado: por la falla Cofradía en el Este, evidenciada por un escarpe pequeño de orientación NNE; por la falla Nejapa al Oeste, con una orientación NO-SE y el escarpe de Mateare; al Norte, el graben se pierde en el lago Xolotlán; y hacia el Sureste, es limitado por la falla Mateare y la falla Las Nubes; mientras hacia el Sur, el límite se encuentra dentro de la caldera de Las Sierras (INETER, 2002, Figura 6-A).

La falla Nejapa (FN), siendo uno de los principales límites del graben de Managua, presenta una dirección con tendencia NS y una longitud de 25 km (Avellán, 2009). Según Espinoza, (2007), la FN tiene un movimiento normal con un componente lateral derecho, de geometría en échelon derecha, con dirección N5°E, buzando hacia el Este, así mismo, afirma que esta falla tiene un ángulo de apertura de ~20°

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

y se encuentra conformada por tres segmentos (Norte, Central y Sur), con zonas de relevo ~0.8 km en la parte Sur y 0.9 km en la parte Norte. Uno de los rasgos estructurales importantes que presenta la FN, se da a lo largo de la misma, donde afloran ~30 estructuras volcánicas (conos de escoria, maares, remanentes de conos de tobas y un estratovolcán, Figura 6-A).

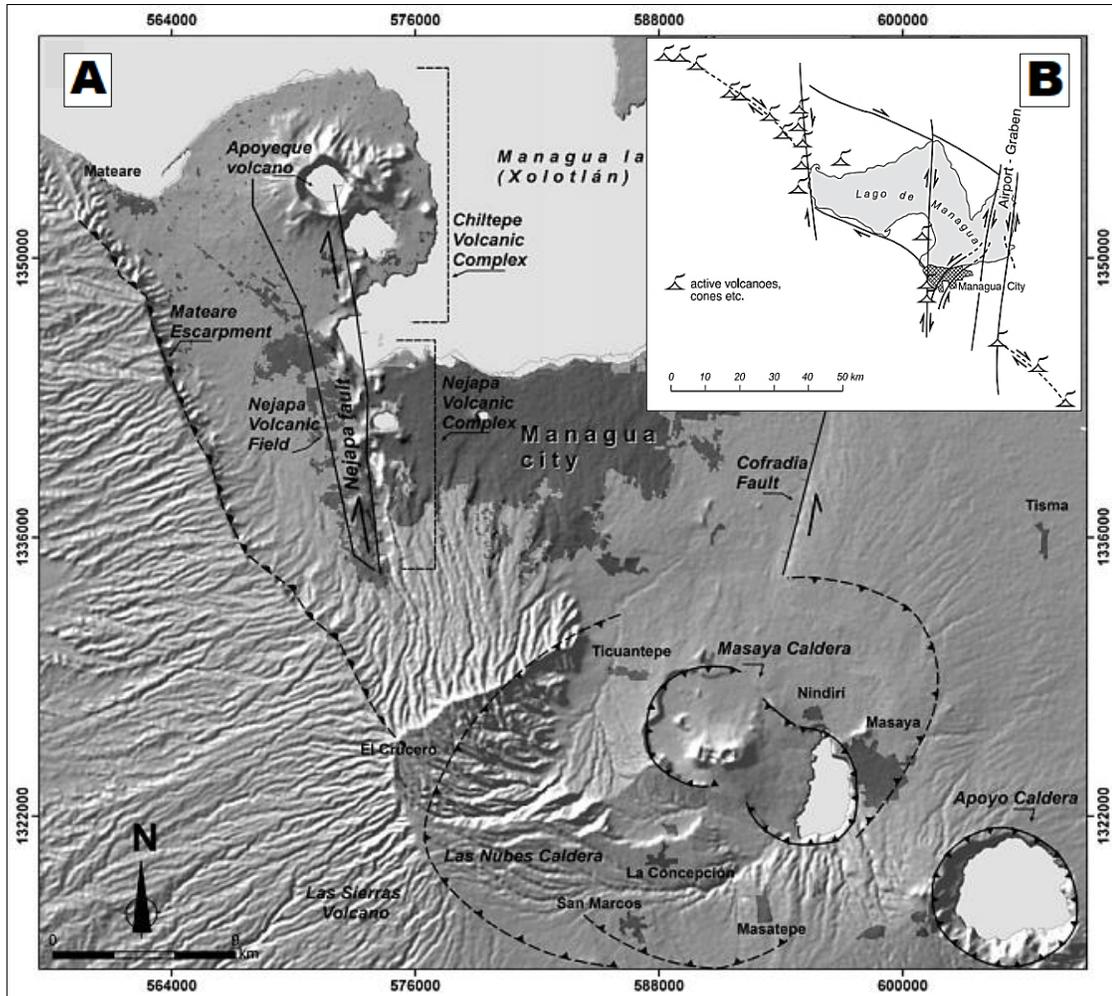


Figura 6. Graben de Managua y sus límites estructurales.

Fuente: Avellán et al. (2014) y Frischbutter, (2002).

Figura 6-A. Representación de los límites del graben de Managua, mostrando a su vez los volcanes en erupción a lo largo de la falla Nejava y las diferentes estructuras volcánicas fuera del graben (remanente de calderas, calderas, y volcanes activos). **Figura 6-B.** Modelo cinemático combinado para la zona de falla de Managua. Las fallas principales son de rumbo NS. Así mismo, se representa dentro del modelo las estructuras internas (graben Aeropuerto y graben Tiscapa) en las zonas marginales, indicado con líneas discontinuas.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Según Frischbutter, (2002), el graben de Managua se estrecha hacia el Norte con 7 km de ancho cerca del estero San Antonio. De acuerdo con Martínez y Noguera, (1992), dicho graben presenta dos subestructuras con características similares dentro de este; una está representada por el sistema de fallas de Cofradía en el franco oriental del graben de Managua, la cual se ha denominado graben Aeropuerto; y la segunda subestructura, ubicada en el occidente, denominada graben Tiscapa. Sugiriendo así, que dentro de estas estructuras marginales se detectan fallas de tendencia E, con componente de deslizamiento sinistral, que alcanzan una profundidad cortical de 8-10 km, las cuales representan las principales fallas activas dentro del área del graben de Managua (citado de Frischbutter, 2002, Figura 6-B).

El graben Aeropuerto se caracteriza por un patrón de lineamiento facoidal, especialmente en su parte Norte, donde el graben corta el límite de la Depresión de Nicaragua. En su parte Sur entre el límite con el volcán Masaya, aparte del lineamiento mencionado, ocurren alineaciones con tendencias EW. Específicamente, el flanco Este del graben de Managua, representado por la falla Cofradía, se interpreta como una zona de falla oblicua con un componente sinistral de movimiento lateral. Por su parte, el flanco occidental puede ser una zona de falla oblicua con un componente dextral, lo que significa, que el centro del graben aparentemente está siendo empujado relativamente al Sur, en fallas oblicuas que se hundan en el W y en el E. La intensidad de la estructura sigmoidea disminuye hacia el centro del graben, combinada con un dominio creciente de las líneas orientadas a NS, lo que significa que el fallamiento normal se vuelve dominante hacia el centro del graben (Frischbutter, 2002, Figura 6-A).

Por lo antes expuesto, en el centro de la ciudad de Managua, a través de trabajos geológicos estructurales, se han identificado significativas fallas que la atraviesan, entre ellas tenemos: Falla Nejapa, Falla Tiscapa, Falla Estadio, Falla Los Bancos, Falla Chico Pelón, Falla San Judas, Falla Escuela, Falla Zogaib, Falla Centroamérica, entre otras.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

De acuerdo con Frischbutter, (2002), el graben de Managua se interpreta como una estructura compleja de graben, cuya parte occidental puede haberse formado bajo la transtensión dextral dominante en los planos de tendencia NE y la transpresión en los planos de tendencia NW, mientras que su zona marginal oriental (Aeropuerto graben y alrededores inmediatos) está sujeta cada vez más a la dirección Este, bajo la influencia de dominar fallas normales.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2.5. Geología de Managua

Las secuencias estratigráficas de la ciudad Managua se encuentran dentro de la porción central de la Depresión de Nicaragua (Figura 5), específicamente dentro del área comprendida por la cordillera volcánica entre la península Chiltepe (volcán Apoyeque) al Noroeste y volcán Masaya al Sureste, a sus alrededores se reconocen pequeños edificios volcánicos y remanentes de volcanes: Santa Ana, Asososca, Tiscapa, Ticomo, Motastepe, entre otros.

Según Hradecky et al. (1997), el subsuelo de Managua se caracteriza por la presencia de una secuencia volcano-sedimentaria, en la cual se reconocen productos provenientes de los volcanes de Masaya, Apoyeque, Apoyo, de los volcanes perteneciente a la falla Nejapa y de otros edificios fuera de este, como Chico Pelón y Tiscapa, que ahora están como remanente de antigua actividad volcánica (citado de INETER, 2002).

El basamento de Managua está compuesto por productos del grupo Las Sierras, en los cuales se reconocen ignimbritas, ondas piroclásticas y piroclastos de caída, relacionado a explosiones regionales de calderas, que se han formado entre final del Terciario e inicio del Cuaternario, siendo así que sobre él se depositaron secuencias piroclásticas del grupo Las Nubes y del grupo Managua (Hradecky, 1997-2001).

Kutterolf et al. (2007), realizó uno de los trabajos más actualizados con relación a la estratigrafía de la ciudad de Managua, en el cual proponen la estratigrafía en tres formaciones: Las Sierras, siendo esta la más antigua, formación Chiltepe y La formación Managua como las más recientes. No obstante, Avellán (2009), como información litológica reciente, propone la Formación Nejapa (citado de Velásquez et al., 2015).

A continuación, se describen las cuatro formaciones litológicas propuestas para la ciudad de Managua:

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Formación Las Sierras

Girard et al. (2005), determinó que la formación de Las Sierras es un complejo escudo ignimbrítico y basáltico a intermedio. Kutterolf et al. (2007), calculó la edad más joven para esta formación en aproximadamente 34 a 30 mil años, una secuencia de 680 m de depósitos volcánicos del Terciario al Cuaternario. Según Avellán, (2009), la ignimbrita de la formación Las Sierras, es masiva y consiste en fragmentos angulares de lava y pómez subredondeada, inmersos en una matriz de ceniza fina. Los fragmentos de lava son de dos tipos: lavas de color de gris, porfiríticos con bajo contenido de fenocristales de piroxeno; y lavas de color gris claro, porfiríticos, con fenocristales de plagioclasa, anfíboles, feldespatos potásicos y minerales opacos. Los fragmentos de pómez son de color gris oscuro y vesiculares de composición andesítica basáltica.

Esta formación se encuentra dividida en dos unidades: Tefra Unicit (UT) y Tefra Fontana (FT), las cuales se encuentran separadas por un paleosuelo, y fueron estudiada por Williams (1983). La primera compuesta por un depósito de caída de pómez masivo, con espesor de 20 a 65 cm, en la base presenta una ligera gradación inversa y gradación normal en la parte superior; de composición dacítica, diferenciada por su alto contenido de hierro y la composición de su vidrio menos evolucionado (Kutterolf et al., 2007).

Segunda unidad, tefra Fontana, es una secuencia de capas de escoria de color negro, muy vesicular de composición andesítica, su espesor promedio es de 3 m y es atribuida a explosiones Plinianas pertenecientes a la caldera Masaya (González, M., 2012). Kutterolf et al. (2007), concluyo que la tefra Fontana representa el límite superior de la Formación Las Sierras.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Formación Chiltepe

Esta formación da lugar a depósitos volcanoclásticos, que han sido divididos en seis unidades principales, las cuales se encuentran separados de la subyacente Formación Mateare (localizada al Oeste del lago de Managua), por una discordancia erosiva regional de más de 17 mil años, con una amplitud que supera los 50 metros y refleja el sistema de paleodreanaje dirigido hacia el lago de Managua (Kutterolf et al., 2007). Las seis unidades principales que conforman esta formación han sido estudiadas y descritas por diferentes autores, los cuales se mencionan a continuación:

1. Tefra Apoyeque inferior (LAq), datada en ~ 17 mil años; consiste en un depósito de pómez de caída, con gradación inversa, que alcanza los 130 cm de espesor, presenta coloración blanca y composición dacítica que se localiza al Oeste y Noreste de la Península de Chiltepe (Kutterolf et al., 2007).

2. Tefra Apoyeque Superior (UAq), descrita por primera vez por Bice (1985), con una edad de $12,400 \pm 100$ años antes del presente. Se observa al Suroeste, entre la península Chiltepe y la ciudad de Managua. Esta tefra es comúnmente el primer depósito piroclástico en la parte superior de la discordancia regional, es un depósito de caída de pómez, de color blanco, tamaño lapilli, con gradación inversa en su mitad inferior débilmente estratificada, pero masiva y de grano grueso en su mitad superior. La tefra Apoyeque Superior difiere a la tefra Apoyeque inferior, por su composición de matriz vítrea con un mayor contenido de CaO y por el gran contenido de fenocristales. Así mismo se calcula un volumen total de 2.2 km^3 para esta unidad (Kutterolf et al., 2007).

Avellán et al. (2014), por su parte describe que esta tefra se encuentra intercalada con depósitos volcánicos pertenecientes a volcanes como Chiltepe y Nejapa, separada únicamente por paleosuelos en lugares al Sur y dentro de la ciudad de Managua. Así mismo, detalla que, en la mayoría de los afloramientos de esta unidad, aparece como una única capa blanca, masiva, con clasificación inversa, sin

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

embargo, la tefra Apoyeque Superior (UAq) consta principalmente de piedra pómez blanca angular a subangular y presenta tres tipos de clastos líticos (rojo angular, ocre y lava gris redondeada).

3. Tefra Xiloá (XT), es el resultado de una erupción freato-pliniana, con una edad estimada de $6,105 \pm 30$ años antes del presente, es un depósito de caída de pómez vesicular y de color blanco (Velásquez et al., 2015). Según Kutterolf et al. (2007), los afloramientos proximales de XT nunca muestran la sucesión completa y están dominados por estructuras antidunas alternas más gruesas y de grano fino producidas por oleadas piroclásticas en las que las piedras pómez blanca de tamaño lapilli y altamente vesicular se encuentran bien redondeadas. En las secciones más distales, se muestra más claramente con dos capas de ceniza blanca.

4. Tefra Mateares (MaT), es observada al Noroeste del pueblo Mateares y a lo largo del lago de Managua, con espesores mínimos, consiste de intercalaciones de pequeñas capas formadas por fragmentos de tamaño lapilli, cuya composición varía de dacítica en la base a andesítica en la parte superior (Velásquez et al., 2015). Kutterolf et al. (2007), describe que esta unidad de tefra Mateares reposa sobre sedimentos arenosos que cubren una discordancia erosiva, cortando de forma variable profundamente en el XT subyacente, así mismo destaca las características por la que difiere esta tefra de las otras encontrada en esta formación, es debido a su zonificación composicional y las concentraciones elementales en su composición dacítica.

5. Tefra Los Cedros (CdT), es un depósito de pómez de caída recientemente identificado, de 15 cm de espesor, localizada entre el Sureste de Mateares y Oeste de Managua. La composición global de este depósito es dacítica, su coloración varía de blanco rosa a gris claro. Esta unidad solamente forma un solo lecho de pómez de caída, con características de grano fino a medio y presenta gradación inversa, con un espesor de 60 cm. Al Oeste Managua se encuentra entre los depósitos hidroclásticos basáltico de Nejapa y el vulcanismo de Miraflores, del cual se

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

superpone a unos 40 cm de tobas amarillas erosionadas, presentando unos 40 cm de espesor, cubierto por una segunda capa de lapilli de pómez de grano fino, cuyo contenido de líticos y ceniza aumenta conforme asciende (Kutterolf et al., 2007).

6. Tefra Chiltepe (CT), definida así por Kutterolf et al. (2007). Y caracterizada como una tefra de composición dacítica, que representa la erupción pliniana más joven y más grande del complejo volcánico Chiltepe, encontrada al Oeste de Managua, sobreyaciendo a la triple capa Masaya y cubierto por la toba Masaya; la edad calculada para esta unidad es de $2,120 \pm 120$ años antes del presente, descrita por Pérez, (2007), y Freundt, (2006); (citado de Kutterolf et al., 2007).

De acuerdo con Kutterolf et al. (2007), la pómez blanca dacítica y altamente vesicular de la tefra Chiltepe (CT), es más rica en cristales que otras tefras de la formación Chiltepe, presentando cristales de olivino de hasta 1 cm de tamaño, con ocasionales bordes oscuros de fusión máfica. Por su parte Avellán, (2009), detalla que esta capa tiene una estructura masiva, de coloración amarillo a blanco, conformada por fragmentos de pómez tamaño lapilli a ceniza gruesa. Mientras tanto, Pardo et al. (2008), describió la pómez de esta unidad como: pómez blancas muy vesiculosas, angulares, de hasta 1,5 cm de diámetro, con abundantes fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Formación Managua

De acuerdo con Kutterolf et al. (2007), la formación Managua está compuesta por siete unidades de tefra, presentando composiciones tales como: basalto hasta riolita, las cuales difieren de las tefras predominantes dacíticas pertenecientes al complejo volcánico de Chiltepe; así mismo, describe que estas unidades de tefra son producto de grandes erupciones atribuidas a la Caldera Masaya y Apoyo, producidas a lo largo de los últimos 25 mil años, su composición va de basáltica a riolítica:

1. Unidad Pómez de Apoyo (PA). Kutterolf et al. (2007), reconoció que esta unidad está dada por dos erupciones de Apoyo, las cuales se encuentran separadas, subdividiendo así la unidad en LAT (tefra Apoyo Inferior) y UAT (tefra Apoyo Superior). La tefra apoyo Inferior y la tefra Apoyo superior se encuentran separadas por un horizonte de meteorización y discordancia erosiva local o paleosuelo de color marrón en la parte superior de la toba freatomagmática perteneciente a LAT (tefra Apoyo Inferior).

Tefra Apoyo inferior (LAT), con una edad datada de $23,890 \pm 240$ años, es un depósito de pómez de clasificación débilmente inversa y se encuentra cubierta por una secuencia estratificada de hasta 4 m de espesor de lapilli ricos en líticos y lechos de ceniza con estratos cruzados de ángulo, esto producto de erupciones freatomagmáticas terminales a freáticas. Caracterizada por dos erupciones; la primera erupción produjo un depósito de pómez de caída; y la segunda un depósito de toba de origen freatomagmático, siendo éste el más alto y se presenta finamente estratificado con lapilli acrecional en los bordes Oeste de la caldera Apoyo (Kutterolf et al., 2007).

Tefra Apoyo Superior (UAT), datado por Kutterolf et al. (2007), en $24,650 \pm 120$ años antes del presente. Esta unidad de tefra está dividida en tres paquetes; tales son:

- UAT-1. De acuerdo con Kutterolf et al. (2007), es un depósito de caída estratificado de pómez blanco, tamaño lapilli, con estratificación de moderada

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

a bien clasificada, con intercalaciones de delgadas capas de ceniza, y representa la primera fase Pliniana de la erupción.

- UAT-2. Formada por una sucesión de depósitos de oleadas, flujos piroclásticos y depósitos de caída; aproximadamente a la mitad de esta secuencia se encuentran varias capas de oleadas piroclásticas y productos de caída, con contenido abundante de líticos alterados hidrotermalmente. Las capas de ceniza rosa que se encuentran en este paquete, consisten totalmente de material alterado hidrotermalmente finamente triturado; por lo que se infiere sobre la fase de esta erupción, la cual debió ser muy inestable. Así mismo, este paquete de tefra se erosiona localmente y se reemplaza por sedimentos reelaborados lo que sugiere una pausa en la erupción antes de la formación del tercer paquete (Kutterolf et al., 2007).
- UAT-3. De acuerdo con la descripción de Kutterolf et al. (2007), este paquete de tefra está constituido por oleadas y depósitos de caída de pómez de grano grueso, la mayoría de estos pobres en líticos, sin embargo, en el borde Norte de la caldera se puede encontrar una unidad basal de oleada rica en bloques de lava. Mientras tanto, los depósitos de caída pómez, alcanzan los 20 m de espesor con solo unos pocos horizontes intercalados con oleada piroclástica; en el borde occidental de la caldera hacen presencia los depósitos de oleada con abundantes bloques de pómez rosa, característica predominante que distingue este paquete de tefra de los otros antes mencionados, correspondiendo así a las capas más gruesas y por la cual representa la fase eruptiva pliniana más poderosa.

2. Tefra San Antonio (SAT), datada e identificada recientemente por Pérez y Freundt, (2006), para la cual estiman una edad menos de 6,100 años. Al Sur de Managua la tefra San Antonio se encuentra por encima de TX (tefra Xiloá) y está reposa sobre la unidad UAq (Unidad Apoyeque Superior), que a su vez se ubica por encima de la unidad UAT (tefra Apoyo Superior), siendo estas tres unidades de tefra separadas por paleosuelos y sedimentos tobáceos de color amarillentos por su alteración (citado de Kutterolf et al., 2007).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

De acuerdo con Kutterolf et al. (2007), la tefra San Antonio se caracteriza por una secuencia de escoria negra, cubierta por oleadas piroclásticas que fueron encontradas al Noroeste, Norte y Sur de la Caldera Masaya, donde los afloramientos más proximales muestran una secuencia más baja de capas de caída alternas de ceniza gruesa a escoria fina de lapilli bien clasificada y tobas freatomagmáticas de grano fino, seguido por una capa prominente y bien clasificada de escoria lapilli negra vesicular y una capa de lapilli muy distinta, con alto contenido de fragmentos líticos alterados hidrotermalmente, de coloración amarillentos y rosáceos; la secuencia se encuentra dominada hacia arriba por depósitos de oleaje con estratos cruzados, estructuras de dunas de ángulo bajo y lechos ricos en lapilli de acreción intercalados.

La unidad termina con un depósito bien clasificado de lapilli vesicular mixto y denso rojo; la escoria lapilli altamente vesicular contiene claramente más vidrio evolucionado que los fragmentos moderadamente vesiculares y están reducidos a capas en la base de la sucesión de tefra (Kutterolf et al., 2007). El SAT (tefra San Antonio) está cubierto por un depósito volcanoclástico reelaborado, que se encuentra coronado por una discordancia regional erosiva. Por ello la tefra San Antonio está dispuesta por debajo de MaT (tefra Mateares); sin embargo, según Kutterolf et al. (2007), no hay evidencia geológica que respalde eso.

3. Tefra Concepción (LCT), aflora al Sur de la Caldera Masaya, con espesores de hasta 2 m, se encuentra separada localmente de la toba Masaya suprayacente por pequeñas disconformidades erosivas (Kutterolf et al., 2007). Está conformada por 16 capas, correspondiente a ocho capas de caída de escoria tamaño lapilli bien clasificada, que se altera con ocho capas de ceniza endurecidas de origen freatomagmático (Pérez y Freundt, 2006).

De acuerdo con Kutterolf et al. (2007), las capas inferiores de caída de lapilli se presentan con un grano más grueso, de color negro muy vesicular a ceniza gruesa, con pequeños fragmentos líticos de lava basáltica alterados hidrotermalmente; mientras tanto, las capas de ceniza de coloración gris, las cuales se intercalan con

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

las de lapilli, presentan en su mayoría grano fino, estructura masiva y cementada; las capas de toba más superiores cambian a grano grueso, mal clasificadas con espesores cambiantes lateralmente que sugiere un origen de oleada piroclástica.

4. Triple capa Masaya (MTL), llamada así y descrita por Bice (1985), el cual identificó esta capa aflorando al Noroeste de la Caldera Masaya, y describió este depósito como una capa deleznable de ceniza gruesa de color negro, de 5 a 10 cm de espesor, limitado por dos capas en la base y en la cima por toba gris endurecida, de 1 a 2 cm de espesor (citado de Avellán, 2009).

La triple capa Masaya fue datada por Avellán, (2009), donde el paleosuelo inferior a la MTL arroja una edad de $5,945 \pm 90$ años antes del presente. A través de trabajos investigativos sobre las erupciones explosivas más jóvenes de la Caldera Masaya, Pérez y Freundt, (2006), distinguieron dos depósitos (MTL y LCT), los cuales se encuentran en la misma secuencia estratigráfica, pero difieren en arquitectura interna y distribución regional, siendo uno de estos depósitos la Triple capa Masaya (LCT), aflorando al Noroeste y distribuyéndose a través de la ciudad de Managua.

Dicha capa está separada de la tefra San Antonio subyacente por un paleosuelo y una discordancia erosiva, de igual manera, un depósito de toba amarillenta masiva reelaborado le separa de la tefra Chiltepe suprayacente en el área de Managua, mientras que al Sur está directamente superpuesta por la Toba Masaya con una discordancia erosiva local (citado de Pérez et al., 2009).

Kutterolf et al. (2007), reconoce esta capa como una secuencia de siete depósitos principales de caída de lapilli intercalados con cuatro depósitos de cenizas mayores y algunos menores, donde la escoria lapilli es muy vesicular con textura fluida en la base; mientras las capas de ceniza se presentan de manera masivas y laminadas, algunas de estas capas de ceniza no se extienden a grandes.

Por su parte Avellán, (2009), describe que al Occidente de Managua, esta capa sobreyace en contacto irregular a un depósito de escombros que cubre el contacto erosivo a la tefra Motastepe, así mismo afirma, que esta unidad consta de una

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

sucesión de seis capas deleznable de color gris, compuesta por escorias de tamaño lapilli a ceniza gruesa a fina; e intercaladas con tres capas consolidadas de ceniza, de color amarillento a marrón, con un espesor máximo de 36 cm, los que disminuyen hasta 15 cm; sin embargo, es común encontrar la unidad conformada solamente por tres capas, pero en zonas topográficamente bajas.

No obstante, Pérez et al. (2009), explica este depósito como una facie, denominada Facie de Managua del MTL Norte y Noreste de la caldera. La cual está constituida por 10 capas, de las cuales 7 se componen de escoria lapilli a ceniza gruesa y las otras son tobas; así mismo detalla que este depósito aflora por la carretera de San Antonio Sur a El Crucero, donde la facie alcanza su máximo espesor.

5. Toba Masaya (MT), descrita por primera vez por Krusi y Schultz, (1979), y Bice (1985). Pérez y Freundt, (2006), detallan la toba gris máfica de Masaya como un depósito de oleada freatomagmática que se extiende a más de 35 km desde su nacimiento, la caldera Masaya (citado de Kutterolf et al., 2007).

La edad de una muestra de paleosuelo obtenida de la parte inferior de la TM, se ha estimado en $3,485 \pm 90$ años antes del presente (Avellán, 2009). Se atribuye el origen de esta unidad a una de las erupciones más jóvenes registrada de la Caldera Masaya, distribuyéndose de manera radial a sus alrededores, Bice, (1985); Pérez y Freundt, (2006), (citado de Avellán, 2009).

La Toba Masaya se compone principalmente de lecho antidunas ricos en cenizas que contienen lapilli basáltico juvenil denso a pobremente vesicular y fragmentos de lavas basálticas preexistentes en un matriz de ceniza fina vítrea. Los fragmentos juveniles son mayoritariamente taquilíticos con presencia de fenocristales. Esta unidad a su vez se encuentra separada de la Triple capa Masaya (MTL) subyacente y la Tefra Concepción (LCT), por capas de toba amarilla erosionada, discordancias erosivas locales, y en el Oeste de Managua por la Tefra Chiltepe (CT) intercalada (Kutterolf et al., 2007).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Según Pérez y Freundt, (2006), el espesor acumulativo de la MT, alcanza los 15 m; y está definido por cuatro unidades principales, éstas compuestas por tobas de acreción de lapilli intercaladas, con cambios estructurales, donde su brecha basal ocurre dentro de 1 km hacia el NE desde el borde de la caldera. En las partes más distales del depósito, la unidad es un paquete amarillento endurecido planar-laminar de bancos de arena fina con lapilli acrecional (citado de Kutterolf et al., 2007)

6. Ticuantepe Lapilli (TIL), de acuerdo con Pérez y Freundt, (2006), este depósito se encuentra bien clasificado de escoria lapilli de color negro; y está constituida por cuatro pequeñas capas de escoria tamaño lapilli color negro, bien clasificadas, vesicular; las que están intercaladas por tres capas de cenizas ricas en líticos. La escoria lapilli vesicular se presenta junto con el lapilli juvenil redonda y densa. Estudios revelan que la composición juvenil andesítica de los depósitos TIL y MT, presentan una fase terminal de la erupción freatomagmática MT (citado de Kutterolf et al., 2007).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Formación Nejapa

De acuerdo con Velásquez et al. (2015), en esta formación se encuentran los depósitos de 19 volcanes monogenéticos, que incluyen conos de toba, maar y conos de escoria; conformada en tres secuencias, las cuales han sido estudiadas por Avellán, (2009), y están descritas a continuación:

1. Secuencia Ticomo dividida en:

a) Lavas de Ticomo (LT), considerada como el depósito más antiguo emplazado de Norte a Sur y relacionado con erupciones fisulares, se encuentra aflorando en la ladera interna Oeste del complejo Ticomo y al Sureste de Nejapa, dicha unidad aparece por debajo de la Tefra Fontana y en contacto concordante sobre las ignimbritas Las Sierras; aflora en pocas secciones al Noroeste de Ticomo, debido a que se encuentra cubierta por depósitos jóvenes. La LT, presenta un espesor de 21 m y está compuesta por tres flujos de lava masiva de coloración gris claro, de textura porfírica con fenocristales de piroxeno y una composición química andesita basáltica, cada uno de estos flujos muestra una autobrecha en su cima y base (Avellán, 2009).

b) Toba Ticomo (TbT), según Avellán, (2009), esta unidad se encuentra aflorando en toda la ladera interna Oeste del cráter Nejapa y sobreyace al paleosuelo formado encima de la Tefra Fontana, así mismo, se presenta en el noroeste de Ticomo, aflorando en superficie como una capa masiva en su parte inferior y ligeramente estratificada en su parte superior, compuesta por cenizas de color gris verdoso con estructuras de dunas. Principalmente la unidad TbT, es de color gris y está constituida por un paquete de cinco capas consolidadas formadas por oleadas piroclásticas, con un espesor mínimo de hasta 16 m, presentando estratificación tabular. Esta secuencia de cinco capas ha sido clasificadas y descritas de la siguiente manera:

- Capa TbT-A, la cual consiste en 8 capas de oleadas piroclásticas, con 2.3 m de espesor, su base se presenta de manera masiva y consta de lapilli gruesa y ceniza, mientras en su parte superior se encuentra un paquete de siete capas de ceniza

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

masiva estratificadas, con estructura de planos paralelos alternadas con capas de lapilli gruesa a fina y que varía de gradación de inversa a normal.

- Capa TbT-B, clasificada como la segunda capa, formada por un flujo de bloques y cenizas, presentando estructuras masivas, de bloques subangulares de composición andesítica de hasta 30 cm de diámetro, con matriz rica en líticos ignimbríticos y ceniza gruesa; esta capa cuenta con un espesor de 1.5 m.

- Capa TbT-C, conformada por cinco capas de oleadas piroclásticas de 2.3 m de espesor, estratificadas lateralmente, compuesta por ceniza gruesa consolidada en su parte inferior y por lapilli media con ceniza gruesa en su parte superior.

- Capa TbT-D, constituida por una sucesión de doce capas principalmente de lapilli y ceniza, con un espesor de 3 m, presenta una estructura interna de laminación y dunas interestratificadas.

- Capa TbT-E, conformada por ceniza en su parte inferior, presenta estratificación cruzada, bloques andesíticos e ignimbríticos alineados de hasta 30 cm y lapilli gruesa, en su parte superior, está formada por dunas con dirección de flujo hacia al Norte y laminación seudoestratificada.

c) Unidad tefra Altos de Ticomo (TAT), es una secuencia de siete capas de caída de escoria de composición basáltica, de color negro, presentando un espesor de hasta 2.4 m a 929 m. Encontrada aflorando en la parte interna del Sureste de Ticomo en contacto directo sobre depósitos de la tefra Nejapa y en su parte inferior en contacto erosivo con productos aluviales (Avellán, 2009).

2. Secuencia Nejapa

Constituida por cinco unidades entre lavas de composición basáltica y productos piroclásticos, los cuales se describen a continuación:

a) Unidad tefra San Patricio (TSP), descrito por Avellán, (2009), como un depósito conformado por una secuencia de tres capas de escorias rojas de caída, superpuestas, con un espesor estimado de 112 m mínimo, presentando en su base 12 m de lavas y bombas aglutinadas, con diámetro de hasta 3.5 m. En la parte

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

intermedia de la unidad se forma por una caída de escoria masiva con fragmentos tamaño bomba, soportados por una matriz de fragmentos de escoria vesicular tamaño lapilli. La parte superior de la unidad se encuentra formada por una secuencia de 72 capas de escorias de caída y presentan planos paralelos con gradación múltiple inversa. La TSP, se encuentra aflorando a 600 m al Este de Nejapa, sobre la Pista Suburbana.

b) Unidad Lavas Batahola (LBT), descrita por Pardo et al. (2008), como una secuencia de cinco capas de lavas de composición basáltica, gruesas, masivas, litificadas, expuestas en la pared Oeste dentro del cráter Asososca. Avellán, (2009), por su parte, describe esta unidad como una colada de lava masiva con textura porfirítica, con fenocristales de piroxenos y plagioclasas, con matriz de color gris oscuro, la cual se extiende desde el Noroeste de Nejapa, en la base del cono Motastepe hasta el Norte de Asososca. La unidad LBT, puede alcanzar hasta los 60 m en su mayor espesor, y hasta 36 m en las partes más bajas.

c) Unidad tefra Nejapa-Norte (TNN), se encuentra expuesta a lo largo de la nueva carretera a León, alrededor del cráter Nejapa en su parte Norte y en el Sur interno del cráter Asososca. Esta unidad ha sido dividida por Pardo et al. (2008), en cuatro capas espesas, sin embargo, Avellán, (2009), ha clasificado este depósito en seis capas de acuerdo a sus rasgos estratigráficos, las cuales se describen a continuación, desde su base hasta su parte superior:

- Capa TNN-A, denominada así por Avellán, (2009), pero nombrada como NNT-A por Pardo et al. (2008); quien menciona que esta capa posee 4 m de espesor, compuesta por oleada piroclástica masiva, muy mal seleccionadas, con bloques ignimbriticos, líticos basálticos-andesíticos de hasta 1 m de diámetro, soportados por una matriz de lapilli gruesa y ceniza, con pocos fragmentos de escoria negra juvenil y de poca vesicularidad.

- Capa TNN-B, nombrada por Pardo et al. (2008), como TNN-B. Esta capa se encuentra en contacto directo-erosivo con la capa TNN-A. La TNN-B, presenta 0.7 m aproximadamente de espesor de oleada piroclástica; en su posición inferior se

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

presenta con 0.5 m espesor de ceniza y lapilli, masiva, con bloques angulares y redondeados de hasta 20 cm de diámetro. En su parte superior cubriendo el resto del espesor principal, se presentan estratificaciones cruzadas, dunas con crestas con dirección Oeste y Noroeste, constituida por lapilli y ceniza.

- Capa TNN-C, descrita por Pardo et al. (2008), como una secuencia de oleadas piroclásticas, con 0.3 m de espesor, presentando estratificación plano paralela, con gradación inversa y constituida por fragmentos de lapilli y ceniza.

- Capa TNN-D y TNN-E, según Pardo et al. (2007), esta subunidad representa la capa basal e intermedia de la capa TNN-C (denominada así por Avellán, 2009). Se caracteriza por presentar una estructura masiva, de muy mala selección, con bloques de líticos andesíticos y basáltico-andesítico, con soporte de matriz de lapilli y ceniza, con estratificación cruzada y huellas de impacto (Avellán, 2009).

- Capa TNN-F, identificada anteriormente como NNT-C, por Pardo et al. (2007), sin embargo, Avellán, (2009), la subdividió como TNN-F, y la describe como una capa de 2.2 m de espesor, presentando estructuras de estratificación cruzada, con dunas de cresta que migran hacia el Oeste y Noroeste, huellas de impacto con dirección Sur-Sureste, coincidiendo con la dirección del cráter de Nejapa en su Norte. Así mismo, esta capa se limita por dos capas en su base, compuesta por un paquete de 25 capas de oleadas piroclásticas, que presentan estructuras de plano paralelas, con fragmentos subredondeados y angulares de tamaño lapilli grueso y bloques en una matriz más fina; mientras en su parte superior, es limitada por una capa con laminación inclinada de lapilli fina y ceniza gruesa.

d) Unidad tefra Motastepe (TMo), constituida por escorias de caídas, las cuales conforma el cerro Motastepe, aflorando en la base del mismo. En su parte superior está compuesta por tres capas de escorias negras-rojizas de caída. En su porción media como una estructura masiva, es representada por 40 cm de espesor, compuesta por fragmentos de escoria juvenil, de características: deleznable, tamaño lapilli de grueso a medio y con presencia de bombas. En la base de esta secuencia, se aprecian 0.3 m de espesor de estructura masiva, moderadamente

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

seleccionada, conformada por fragmentos de lapilli, escoria juvenil y de superficies irregulares de composición basáltica (Avellán, 2009).

e) Unidad tefra Nejapa (TN), formada por un depósito constituido por oleadas piroclásticas (Pardo et al., 2008; Avellán, 2009).

Avellán, (2009), ha descrito y subdividido esta unidad en tres partes, nombrándolas como: TN-A, conforma la porción inferior de la unidad; TN-B, como parte de la porción media; y TN-C, constituyendo la parte superior.

TN-A, como capa basal de la unidad de aproximadamente 0.15 - 0.45 m de espesor, se caracteriza por poseer ceniza de color gris verdoso en su parte más baja y en su porción inferior-superior presenta dos horizontes pseudoestratificados, así mismo, está conformada por fragmentos de escoria juvenil de coloración negra-rojizo, tamaño lapilli media a fina, y fragmentos accidentales de pómez y líticos de lavas oxidados.

TN-B, cuenta con un espesor de 3.40 m, y está constituida por 25 capas aproximadamente, compuestas por fragmentos de lapilli media a ceniza gruesa en su porción inferior y formada por fragmentos de lapilli grueso en su parte superior; estos fragmentos principalmente están conformados por lavas basálticas andesítica y de pocos fragmentos ignimbriticos.

TN-C, compuesta por fragmentos de tamaño lapilli a ceniza, se caracteriza por mostrar estructuras de estratificación cruzada, dunas de dirección Sureste y estructuras laminadas compuestas por tefra. Esta capa presenta 1.15 m aproximados de espesor.

3. Secuencia Asososca

Esta secuencia se encuentra subdividida en siete unidades, las cuales están compuestas de productos piroclásticos, descritas detalladamente a continuación:

a) Unidad Toba Cuesta El Plomo (TCP), denominada por Pardo et al. (2008), como CPT, indicando que aflora en la pared interior oriental del cráter Asososca y

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

subdividida en tres capas según los autores antes mencionado, sin embargo, Avellán, (2009), divide esta unidad solamente en dos subunidades, las cuales denomina y describe como: TCP-Inferior y TCP-Superior.

Unidad TCP-Inferior, constituida por una capa de aproximadamente 7 m de espesor, de estructura masiva, color gris oscuro, formada por ceniza compactada, presentando líticos balísticos de composición andesítica y fragmentos redondeados de lapilli fino; en la porción media de la subunidad presenta capas estratificadas compactadas de 3.5 m de espesor, aumentando hasta los 9 m al Norte a orillas del lago Xolotlán. En su porción superior cuenta con 1 m aproximado de espesor, compuesto de líticos tamaño lapilli grueso, con características de ser una capa deleznable, soportada por fragmentos de lapilli fino y ceniza (Avellán, 2009).

Unidad TPC-Superior, compuesta en su parte inferior por 4.5 a 6 m de espesor de oleadas piroclásticas de color gris, de estructura masiva, constituida por fragmentos de tamaño lapilli, líticos balísticos de hasta 20 cm de diámetro compuestos por lavas andesítica basáltica, y en contacto erosivo sobre la Tefra Apoyeque Superior. En su porción media y superior, se encuentra formada por 20 cm de ceniza compactada y presenta hacia la cima una secuencia de tres capas de 30 m de espesor, hasta 30 cm al Noreste de la Cuesta El Plomo; principalmente se caracteriza por presentar estructuras de plano paralelas, conformadas por fragmentos de lapilli de medio a fino, ceniza gruesa, líticos balísticos de lava con 20 cm de diámetro, y con estructuras de dunas mal desarrolladas (Avellán, 2009).

b) Unidad Tefra Refinería (TR), se encuentra aflorando en la pared interna Norte del cráter Asososca, cubriendo en contacto erosivo a la Toba Ticomo. Divide en tres subunidades, tales son: RT-A, RT-B, RT-C. La RT-A, presenta estructuras cruzadas, formada por capas delgadas de escoria subredondeada, líticos de lapilli de color marrón alterado y escasos líticos de composición andesítico-basáltico; RT-B, compuesta por una capa masiva, de grano bien clasificado, con gradación inversa, de 20 cm de espesor de escoria y lapilli; y finalmente la RT-C, representa la subunidad superior de esta unidad, compuesta por una secuencia de capas de 10

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

a 30 cm de espesor, presenta estructuras cruzadas en capas de lapilli grueso, de color rojo marrón, redondeada y alterada, con cristales de olivino, incrustados en una matriz de ceniza gris abundante, y con presencia de lapilli acrecional en su porción más superior (Pardo et al., 2008).

c) Unidad Tefra Satélite (TS), aflorando en la pared interna Norte de Asososca, compuesta por depósito de oleadas piroclásticas, de 1 a 15 cm de espesor, endurecida, de color gris, con escasos líticos de escoria gris y lapilli, huellas de impacto de fragmentos angulares de composición basáltica-andesítica con dirección al cráter Satélite, en toda la secuencia de este depósito se puede encontrar lapilli acrecional (Pardo et al., 2008).

d) Unidad Flujos Piroclásticos de Ceniza (FPC), definida así por Pardo et al. (2008), quienes describen que esta unidad se encuentra aflorando por encima de la Tefra Satélite (TS), en la parte Noroeste del cráter de Asososca, y en discordancia angular con las Lavas Batahola; mientras que en su lado Norte se encuentra por encima de la TS y por debajo con dichas lavas. De acuerdo con Pardo et al. (2008), esta unidad se presenta en un paquete de tres capas de depósito de flujo de ceniza, con espesores de 1 a 17 m. Por su parte Avellán, (2009), menciona que esta unidad es caracterizada por presentar una estructura masiva, muy mal seleccionada, soportada por una matriz de ceniza, con presencia de fragmentos redondeados de pómez amarilla y fragmentos líticos tamaño lapilli.

e) Unidad Tefra la Embajada (TE), compuesta por lavas de composición basáltica y escoria de caída. Según Avellán, (2009), las lavas basálticas superan los 30 m de espesor, mientras tanto, las escorias se elevan por encima de las lavas con aproximadamente 200 m de espesor.

De acuerdo con Avellán, (2009), la unidad presenta una sucesión de 20 capas de escoria roja juvenil de caída, estas capas se caracterizan por estar pseudoestratificadas buzando hacia el Norte. Así mismo, afirma que la secuencia de capas se desarrolla como una estructura masiva, aglutinadas, de mala selección,

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

conformado por escorias de tamaño lapilli a ceniza gruesa y con bloques de lava de composición basáltica andesítica.

f) Unidad Tefra el Hormigón (TH), para Pardo et al. (2008), la TH es asociada como perteneciente a la última fase eruptiva que dio origen a la Tefra Nejapa Norte, así mismo, caracterizaron esta unidad como una sucesión de oleadas formadas por tres subunidades, dividida respectivamente como porción inferior, intermedia y superior: su porción inferior cuenta con un espesor de 6 m, es de estructura masiva, conformada por escoria juvenil de caída, tamaño lapilli; en su parte intermedia está constituida por seis capas de 4.3 m de espesor, de escoria de caída de tamaño lapilli, de color negro, con presencia de bloques aglutinados de lava; finalmente, su parte superior se encuentra formada por una capa masiva de hasta 13 m de escoria de caída, de tamaño lapilli y con presencia de bombas de lava basáltica (citado de Avellán, 2009)

g) Unidad Tefra Asososca (TA), esta unidad ha sido definida y descrita por (Pardo et al. (2008); y Avellán, (2009); encontrada aflorando ampliamente en superficie al Noroeste del complejo Nejapa y Suroeste del Cráter Asososca. Es un depósito formado por una sucesión de oleadas piroclásticas, con un espesor de 28 m aproximadamente, constituida por ceniza gruesa y lapilli, en sectores cercanos al cráter de Asososca presenta estratificación cruzada, presentando dunas y huellas de impacto con dirección al cráter (citado de Avellán, 2009).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2.6. Geomorfología de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua

La Subcuenca II de la Cuenca Sur del lago de Managua, cuenta con rasgos geomorfológicos que varían desde planicies hasta montañas abruptas, estas son: planicie de Managua, sistema montañoso de Las Sierras de Santo Domingo, la sucesión de cerros y lagunas tales como Ticomo, Nejapa, Motastepe, Asososca, Xiloá y Tiscapa en el centro de la ciudad (INIDE, 2013).

De acuerdo con JICA & INAA (1993), la parte principal de la ciudad de Managua esta sobre la meseta baja y plana con un gradiente de 2,2 grados, donde se encuentran muchos conos y cráteres de volcanes jóvenes, de los cuales muchos de ellos son de colapso compuesto y mantienen lagunas dentro de ellos. Mientras que al Norte en las Sierras de Managua tienen un gradiente de 3,6 grados, en el área montañosa detrás de la ciudad, donde su elevación máxima alcanza los 940 metros aproximados, proyectados dentro del área de la depresión nicaragüense.

No obstante, Velásquez et al. (2015), definieron para el municipio de Managua doce unidades morfotectónica-volcánicas (UMTV), las cuales han sido establecidas con el fin de caracterizar el relieve resultante de la fragmentación de la cadena volcánica nicaragüense y la formación del graben de Managua. De la cuales seis de estas doce unidades morfotectónica-volcánicas forman parte de la zona media-alta, media y baja del área en estudio, las cuales se describen brevemente a continuación (Figura 7).

UMTV II. Ticomo – Los Martínez, definida como una zona de debilidad cortical compuesta por numerosos cráteres volcánicos y conos monogenéticos. Su altitud varía de 40 a 400 msnm, las pendientes oscilan entre 1 a 45 grados, y las orientaciones de laderas están dadas al N, E, O, SE y SO.

UMTV III. San Judas – Tiscapa, descritas como planicies medias a altas, de carácter acumulativo volcánico. Donde la altitud varía de 40 a 200 msnm, las pendientes entre 1 a 8 grados aproximadamente, exceptuando la pared interna del cráter de la laguna de Tiscapa, que presenta pendientes mayores a 60 grados, y la orientación de laderas es más pronunciada al N y NE.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

UMTV IV. San Juan – Unidad de Propósito, establecida como planicies medias a altas, estructurales y acumulativas, con presencia de pie de monte bajo. Donde la altitud varía de 100 a 400 msnm y las pendientes entre 1 a 8 grados. Con orientación preferencial de laderas al N y NE.

UMTV IX. San Isidro, esta zona es definida como piedemonte volcánico alto, con evidencias esculturales de actividad tectónica reciente. Su altitud varía de 300 a 600 msnm, con pendientes de 8 a 45 grados y laderas orientadas al N, NE.

UMTV X. Cedro Galán – Monte Tabor, definida como piedemonte bajo, con sectores planos sobre una estructura deprimida entre las zonas XI, IX, II. Presentando una altitud entre 300 a 600 msnm, pendientes que oscilan entre 8 a 24 grados y orientación de laderas predominante al N.

UMTV XII. Costa del lago, es una planicie muy baja, acumulativa fluvial y lacustre, semiplana, del sector meridional del graben de Managua. Presenta una altitud de 40 msnm y pendiente de 1 a 2 grados con orientación de ladera preferencial al Norte.

Sin embargo, el área de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, no está cubierta en su totalidad por las unidades antes mencionadas, por lo que en este trabajo se le asignó el área faltante de la parte alta de dicha subcuenca, siendo está el área perteneciente a la parte Norte del municipio de El Crucero, el cual presenta pendientes que van de 20 a 45°.

De acuerdo con los rasgos aproximados propuestos por Pérez, (1979), los valores de pendientes que conforman las diversas áreas en una cuenca, son los presentados en la Tabla 4. Por lo cual, el área mencionada, se definió, como una zona fuertemente accidentada y de relieve escarpado.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Tabla 4. Rangos aproximados de pendientes en una cuenca.

| Pendiente Media (%) | Terreno (descripción) |
|---------------------|-------------------------|
| 0 a 2 | Llano |
| 2 a 5 | Suave |
| 5 a 10 | Accidentado medio |
| 10 a 15 | Accidentado |
| 15 a 25 | Fuertemente accidentado |
| 25 a 50 | Escarpado |
| >50 | Muy escarpado |

Fuente: Pérez, (1979).

En la **Figura 7. A y B**, se muestran las unidades morfotectónica-volcánicas (UMTV) representadas por colores que varían; los tonos verdes claros a verde forman las unidades de acumulación de sedimentos piroclásticos y lacustres, la parte media de la Subcuenca II, de tonalidad amarillo a naranja oscuro, representa la transición de esta zona de acumulación a una zona de piedemonte volcánico alto, la cual es dominada por la UMTV IX. Finalmente, en la parte superior del área, representada por el color blanco, muestra un área donde la altura alcanza pendientes de 30 a 45° siendo esta una zona muy escarpada.

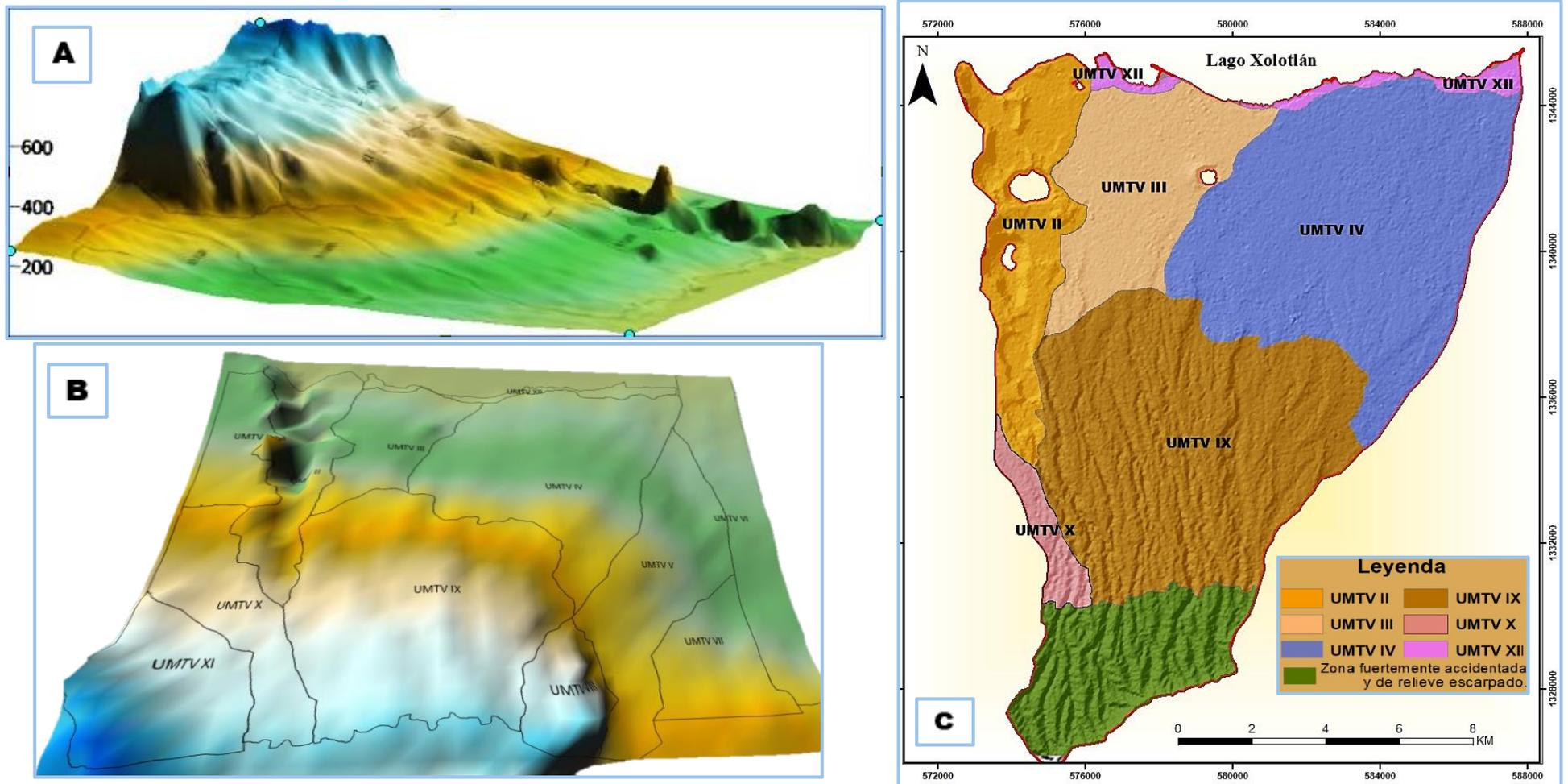


Figura 7. Morfología de la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Fuente: Velásquez et al. (2015).

(Elaboración Propia)

Figura 7-A y 7-B. Representación en 3D y en planta de la morfología de la ciudad de Managua donde se encuentran los límites del área en estudio. **Figura 7-C.** Mapa representativo de las unidades morfoestructónicas-volcánicas (UMTV) que forman parte de la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2.7. Hidrología de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua

A nivel regional, la Cuenca Sur del lago de Managua, se encuentra inserta en la cuenca hidrográfica Río San Juan (Cuenca 69), la cual alberga los dos grandes lagos de Nicaragua (Lago Cocibolca y Lago Xolotlán). En particular, el lago de Managua no desagua por un río regularmente, sino que pierde sus aguas ante todo por evaporación, funcionando como un sistema cerrado. La referida Cuenca Sur, se encuentra conformada por cuatro sub-áreas que la dividen, siendo la Subcuenca II una de ellas.

Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua. Presenta una forma de abanico y nace en el parte-aguas de El Crucero y Las Nubes. Desde el punto de vista hidrológico la Subcuenca II, está caracterizada por un drenaje superficial paralelo de naturaleza endorréica, drenando por el Sur, desprendiéndose hacia el Norte por un sistema de cañadas, cuevas, taludes, lechos de sedimentación, cárcavas y planicies hasta desembocar al lago Xolotlán; en su parte alta, al Sur y Suroeste de la ciudad, el drenaje es definido a favor de la pendiente (Figura 8).

Sin embargo, debido a la baja permeabilidad a causa de las notables inclinaciones de pendiente en el flanco Sur-Suroeste y al desarrollo urbano de la ciudad de Managua en las partes: media alta, media y baja, de la subcuenca II, está presente solamente un drenaje pluvial de causes revestidos y no revestidos, que recorren la ciudad y drenan en su mayoría al lago de Managua. No obstante, en la parte alta, el área perteneciente al municipio de El Crucero, se pueden encontrar ríos efímeros de carácter influente, mientras en la parte media y baja presenta cuerpos de aguas superficiales, tales son: Laguna de Asososca, Laguna de Nejapa, Laguna de Acahualinca, y Laguna Tiscapa (Figura 8).

Laguna de Asososca, de 1.2 km de diámetro, con una profundidad media de 95 m, y una elevación de 36.5 (msnm); Laguna de Nejapa, cuenta con una elevación de 42.49 (msnm), tiene 43 metros de diámetro, y una profundidad media de 3.5 m; Laguna Tiscapa, cuenta con una elevación de 48.53 (msnm), con 500 m de diámetro y una profundidad media de 40.6 m; Laguna de Acahualinca, con un diámetro de 0.06 km y una profundidad media de 1 m.

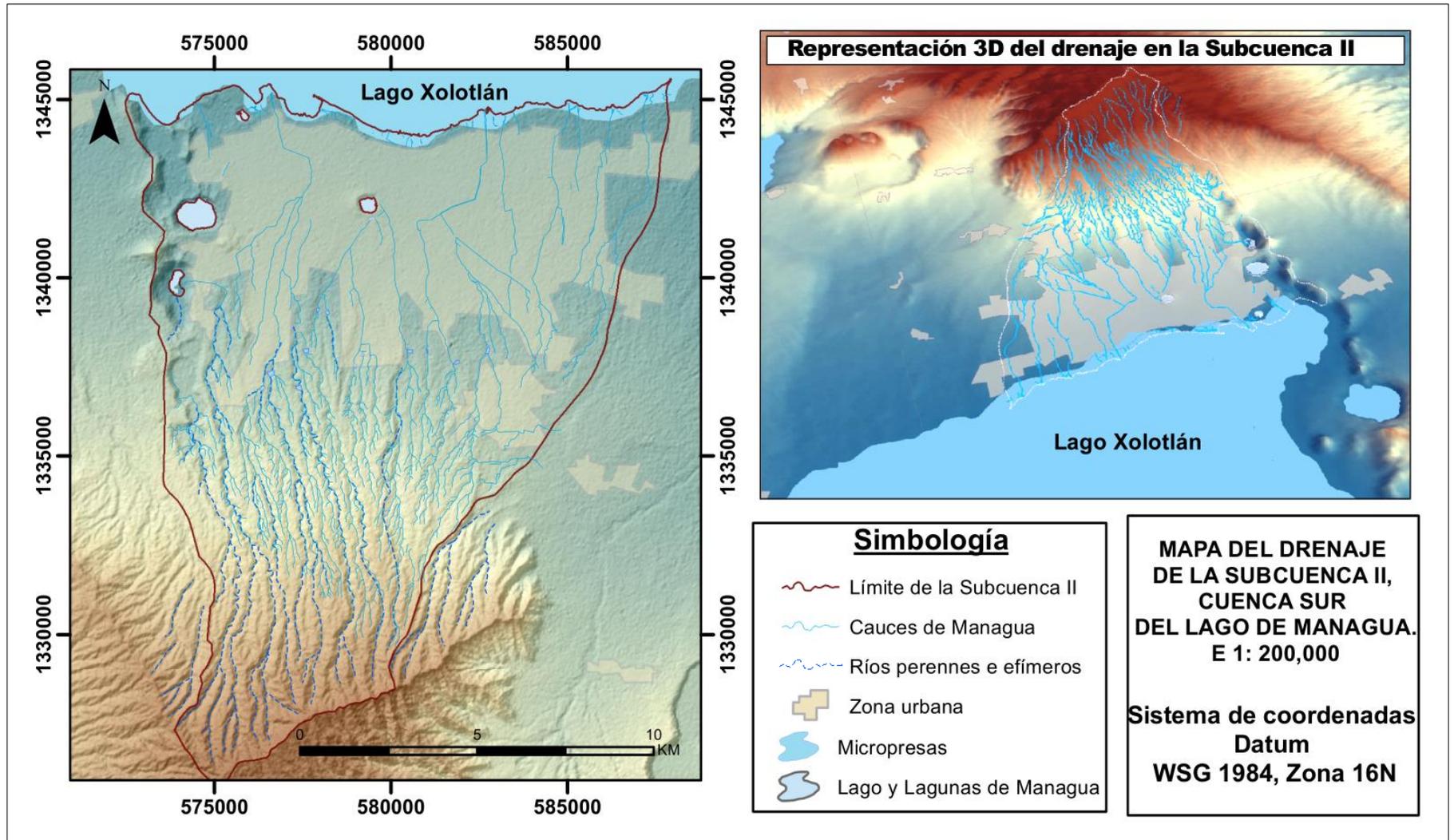


Figura 8. Mapa del drenaje en el área de estudio.

Fuente: ALMA (2017).

Elaboración Propia.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2.8. Hidrogeología de la Cuenca Sur del lago de Managua

Hidrogeología regional y local, según Krázný y Hecht, (1998). El territorio de Nicaragua se encuentra dividida en tres provincias hidrogeológicas, denominadas: Provincia del Pacífico, Provincia Central, y Provincia del Atlántico; así mismo, cada una de ellas también se han dividido en subprovincias, según sus características hidrogeológicas. De manera regional, la Cuenca Sur del lago de Managua, se encuentra localizada dentro del área comprendida de la Subprovincia Graben de Nicaragua, la cual pertenece a la provincia hidrogeológica del Pacífico, representando a nivel nacional una de las unidades hidrogeológicas más importantes.

Según las características hidrogeológicas generales de la Subprovincia del Graben de Nicaragua, en su mayor área se pueden encontrar un conjunto de cuerpos hidrogeológicos (acuíferos y acuitardos) extensos y complejos, formados por diferentes unidades geológicas. Uno de los rasgos importantes de esta subprovincia, es la conexión hidráulica que mantiene entre sí, así como, la existencia del cuerpo de agua subterránea principal, constituyendo la zona saturada del acuífero y por encima de él, en las zonas elevadas, la presencia de cuerpos de agua subterránea colgados. La subprovincia del graben, se divide en los siguientes sistemas de acuíferos:

- Sistema acuífero de las laderas Suroccidentales de la cordillera del Pacífico (Cuesta Diriamba) - A.
- Sistemas de acuíferos Suroeste - B (abarca el Noroeste del lago de Nicaragua, en su límite Este con el río Tipitapa, el Sur y Noroeste del lago de Managua, Nagarote, La Paz Centro y León).
- Sistemas Acuíferos Noreste - C (al Norte del Lago de Managua, del Río Tipitapa y del Lago de Nicaragua).
- Sistema Acuífero de la Península de Cosigüina - D.
- Sistemas Acuíferos de Islas en el Lago de Nicaragua - E.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Todos ellos, a su vez se delimitan en subsistemas de acuíferos, según su cuenca hidrográfica, zonas de descarga y el curso de las divisorias hidrogeológicas (Figura 53, ver en anexo). Específicamente, el sistema de acuíferos Suroeste - B, es el de interés a describir, ya que abarca al lago de Managua, desde las cuencas descargadas en la parte Noroeste, Oeste y Sur del lago. Dicho sistema, se encuentra dividido en subsistemas de acuíferos, los cuales se mencionan a continuación:

- Subsistemas acuíferos de Rivas
- Subsistemas acuíferos de Granada -Tipitapa (B₂)
- Subsistema acuífero de Managua B₃
- Subsistema de acuíferos Mateare - Puerto Momotombo B₄
- Subsistema acuífero Tamarindo B₅
- Subsistema de acuífero León B₆
- Subsistema acuífero Atoya B₇
- Subsistema acuífero Real B₈

Puntualmente, el área de la Cuenca Sur del lago de Managua, se encuentra dentro del área delimitada como subsistema acuífero Managua B₃. Los autores han dividido este subsistema de acuífero en dos cuencas: Cuenca de Cofradía B_{3a} y Cuenca Asososca B_{3b}, distinguiendo cada una por los incisos a y b para poder describirlas.

Cuenca de cofradía B_{3a}, está se encuentra formada en su parte baja por la depresión piezométrica vasta, extendiéndose desde los alrededores de Ticuantepe en el Sur, hasta las orillas del lago de Managua; al Este, limitada por el Río Borbollón y otros de carácter efluente. El límite occidental de la cuenca no fue definido por los autores, lo cual se puede inferir que este límite se pierde al Sureste de la laguna Tiscapa.

La cuenca de Asososca B_{3b}, está se caracteriza por la depresión piezométrica alrededor de la laguna de Asososca extendiéndose hacia el Sureste, causada por la extracción intensiva de agua subterránea para fines de abastecimiento de la ciudad de Managua. Los autores han llegado a suponer que debido a la falla en el Sur de Miraflores-Nejapa, al Oeste de la depresión de la laguna, se da una elevación

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

en la piezometría, la cual es poco expresiva, separando así, otra depresión piezométrica del Valle de Los Brasiles. Mientras al Sur y al Suroeste, limita por la existencia de una zona de barrera de permeabilidad baja que causa también el gradiente hidráulico notable en las laderas Nororientales de la Cuesta de Diriamba.

La laguna de Asososca, hidrológicamente, se sitúa en la zona de descarga regional de la cuenca de Asososca B_{3b}, la parte inferior del cráter se encuentra relleno por agua de origen casi exclusivamente subterránea y la profundidad alcanza ~91 metros (desde el nivel de agua al fondo). Desde el punto de vista hidráulico, el cráter funciona como un pozo de grandes dimensiones, lo que permite que el agua de la laguna esté en conexión hidráulica con aguas subterráneas adyacentes.

Según el análisis de los autores, describen que, en algunas áreas de Managua, en base a los resultados de densidad mayor en las líneas equipotenciales, supone la presencia de zonas menos permeables, representadas en el mapa hidrogeológico del Pacífico como barreras hidráulicas poco permeables, siendo una de ellas localizada en las cercanías de la laguna de Tiscapa. Mientras en otras áreas la densidad mayor de equipotenciales parece ser causada por fenómenos estructurales como en el área al Suroeste de Managua (influenciada por la falla Mateares).

Con respecto al Lago Xolotlán, localizado al Norte de la Subcuenca II, en las cercanías del lago el efecto de desagüe está incrementando, debido a la extracción de agua subterránea para fines de abastecimiento de la población o de riego, lo que supone un problema a largo plazo, ya que podría causar el cambio de dirección del flujo de agua subterránea desde el lago hacia el acuífero. La cuenca del Lago, posee una extensión de unos ~4,800 km² y se comporta casi siempre como una cuenca cerrada desde el punto de vista de salida de aguas tanto superficial como subterránea, lo que puede significar un serio peligro con posibles consecuencias ambientales graves.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Hidrogeología de Managua, Según JICA & INAA, (1993). Según las características de las formaciones acuíferas principales para el área de Managua son tres: Los depósitos aluviales con material piroclásticos Cuaternario, el grupo volcánico Masaya y el grupo Las Sierras Medio.

1. Depósitos aluviales con materiales piroclásticos Cuaternarios, se encuentran distribuidos en el Valle de Los Brasiles, entre el escarpe de la falla Mateare y la cadena volcánica de Apoyeque, Asososca, Nejapa, Ticomo y en las áreas costeras del lago de Managua. Particularmente, para el área del Valle de Los Brasiles, se estima que se encuentra relleno por depósitos lacustres compuestos de arena, limo y arcilla, así como de materiales piroclastos Cuaternarios (pómez y escoria). En contraste con el área de las Mercedes, al Este de la ciudad, se estima que los depósitos aluviales de esa área, están principalmente compuestos de arena fina, materiales limosos y arcillosos, con capas lenticulares delgadas de arena gruesa y grava. Así mismo infieren, que en dicha área los materiales piroclásticos estén compuestos por arena volcánica y depósitos de flujo, proveniente del grupo Masaya.
2. Grupo volcánico Masaya, estos depósitos de acuíferos se encuentran yaciendo a lo largo de Ticuantepe, Veracruz, Sabana Grande y Las Mercedes; compuesto por flujos de lava basálticos – andesíticos porosos autobrechados, depósitos de flujo piroclásticos y piroclásticos caídos, permeables que constan, principalmente, de escoria, tamaño grano grueso con fragmentos de rocas.
3. Finalmente el Grupo Las Sierras, (TQps), compuesto por el Grupo Las Sierras Medio TQps (M) y el Grupo Las Sierras Superior TQps (S), encontrando a la TQps (M) parcialmente por debajo de la zona saturada, yaciendo en el subsuelo de todas las sub-áreas hidrogeológicas de Managua. Dicha formación, produce grandes cantidades de agua subterránea provenientes de las capas porosas permeables tales como: flujos de piroclásticos, depósitos piroclásticos de caída, escoria con fragmentos de rocas, zonas meteorizadas con suelos fósiles y zonas de fracturas presentes en los aglomerados basálticos-andesíticos compactados, de toba y toba brechosa.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Sub-área Central de Managua (área que comprende la Subcuenca II, Cuenca Sur)

El Grupo Las Sierras Medio (TQps-(M)), es descrita como la formación acuífera principal dentro de la sub-área central de Managua, según los autores, se encuentra presentando fracturas y quebradas con suelos fósiles de los aglomerados basálticos-andesíticos compactados de tobas y tobas brechosas; así como en las capas porosas permeables de flujos piroclásticos y depósitos de piroclásticos caídos (capas de escoria).

La ocurrencia del agua subterránea para esta sub-área se da por las condiciones topográficas, geológica y algunas áreas que presentan buena cubierta vegetal para una buena recarga. El área de captación de agua tiene unos 237 km². En general, el agua subterránea ocurre en estos acuíferos en condiciones libres o no confinada; aunque en ocasionalmente en condiciones de agua colgada y confinada.

Hidrogeología del acuífero de Managua según, varios autores.

Castillo et al. (2006), considera que el espesor del acuífero en el área de Managua es de 400 a 600 m; y que dicho acuífero está compuesto por una sucesión de depósitos piroclásticos semi - consolidados, y permeables del Pleistoceno, sobre puesto por capas delgadas de aluviones y coluviales del Pleistoceno – Oligoceno, con permeabilidad mayor a 10 m/día. Para dicho acuífero se estima un potencial de 447.016,95 m³/día; por lo que menciona que posee un carácter altamente productivo.

Según MARENA y KTH., (2000a), el agua subterránea del acuífero de Managua proviene del agua de lluvia que se infiltra a través del suelo hasta alcanzar la zona de saturación. El estudio sugiere que la zona saturada o reservorio, se encuentra conformada por rocas del Grupo Las Sierras; mientras que los estratos del Grupo Managua vendrían a conformar la zona de aeración o zona vadosa. Además, estimaron que el movimiento del sistema de flujo de agua, se da en las zonas altas (en los alrededores de la Meseta de los pueblos) y en el graben de Managua, tomando en cuenta que las altitudes de estas zonas varían desde los 925 msnm (en el sector de Casa Colorada - Las Nubes) hasta los 200 msnm (en las Serranías

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

bajas de Mateare). La topografía desciende hasta alcanzar el área más baja con una altitud promedio de 40 msnm, a lo largo de la costa del lago de Managua, que a su vez es considerada la principal zona de descarga del acuífero (citado de Hernández, F., 2012)

Hidrogeología del acuífero Oeste La Sierras, según Martínez & Chevez, (2017).

Hidrogeológicamente, el área de la Subcuenca II, de la Cuenca Sur de Managua se localiza dentro de los límites Noroeste del acuífero Las Sierras, dicho acuífero cuenta con una extensión territorial aproximada de 1058 km² y ha sido objeto de estudio por los antes mencionados.

Según los autores, de acuerdo con el balance hídrico realizado al suelo en la parte Noroeste del acuífero Las Sierras, se estima una recarga total de 427.2734 (mm) anuales; identificando así mismo, a la estación La Primavera (zona Suroeste de la Subcuenca II) como el área de influencia, debido a que presenta valores mayores de recarga anual de 305.8573 mm, a diferencia de las demás estaciones ubicadas en esa área (Figura 54, ver en anexo). Por lo que infieren, esto ocurra debido a que en dicha estación muestra datos de mayor ocurrencia de precipitaciones en el año y presenta la mayor cobertura vegetal de la zona, lo cual permite una mayor permanencia del agua en el subsuelo dando lugar a que se infiltre al acuífero. Por otro lado, mencionan que el factor que desfavorece la recarga dentro del área de la subcuenca es la pendiente.

Así mismo, describen que las profundidades del agua subterránea en el Oeste del acuífero Las Sierra, varían de 6.12 a 207.65 msnm, comportándose según la topografía, es decir, a mayor elevación - mayor profundidad, el cual es dominado por los acuíferos porosos libres, donde la dirección y velocidad de flujo subterráneo se rige estrictamente por la naturaleza geológica del medio. De acuerdo con la piezometría del acuífero Oeste de Las sierras, los autores detallan que este presenta un drenaje subterráneo bien definido, teniendo como condicionante del mismo una barrera hidráulica estable con dirección NS que divide el flujo en dos la dirección de los flujos subterráneo (Figura 55, ver en anexo):

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- Dirección 1. En el Noreste del área, el flujo subterráneo se desplaza en dirección Suroeste-Noroeste.
- Dirección 2. En el Noroeste del área, el agua fluye en sentido Sureste-Noroeste, sin embargo, esta zona presenta un tercer flujo con dirección Suroeste-Noreste el cual converge con el primer y segundo flujo descrito de esta zona. Por lo que el tercer flujo es asociado con la divisoria de agua subterránea que comprende el límite entre el acuífero Las Sierras y el acuífero Chiltepe-Mateare.

Por otro lado, según los cálculos de transmisividad el área Oeste del acuífero Las Sierras, presentan valores que van desde 88.83 hasta 3009 m²/d, de los cuales los autores han agrupado en tres clases:

- 1- Transmisividad mínima, denominada según Krásný & Hecht, como moderadas (Tabla 5).
- 2- Transmisividad alta (valores de, 118.2, 769, 672.26, 769, 928 m²/d).
- 3- Transmisividad muy alta (valor de 3009 m²/d).

En la Tabla 5, se muestran los valores representativos para clasificar la transmisividad.

Tabla 5. Clasificación de transmisividad.

| Clase de Transmisividad | Coficiente de Transmisividad m ² /d | Rango de Transmisividad |
|-------------------------|--|-------------------------|
| I | >1000 | Muy alta |
| II | 100 - 1000 | Alta |
| III | 10 – 100 | Moderada |
| IV | 1 - 10 | Baja |

Representación de la Transmisividad según Krásný & Hecht, (1998). Fuente: Martínez & Chevez, (2017).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Determinando así, respecto a los valores de transmisividad encontrada, que el acuífero presenta un buen rendimiento (coincidiendo con los valores presentados por Krasný & Hecht, (1998)), sin embargo, las variaciones espaciales de las transmisividades en el área, es un indicativo de que el agua subterránea está siendo concentrada en zonas donde hay mayor presencia de pozos, esto puesto que los autores encontraron una zona depresión generada posiblemente por las extracciones intensiva de agua subterránea, dicha zona de depresión es localiza donde se da la mayor concentración de población (zona urbana de Managua).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.2.9. Hidroquímica de la Cuenca Sur de Managua

Hidroquímica según Krasný & Hecht, (1998). En la región del Pacífico de Nicaragua el agua subterránea tiene una clara zonalidad hidroquímica causada por intercambio catiónico. Específicamente, para el área de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua, se puede decir que hidroquímicamente, según los autores, existen dos tipos de caracteres hidroquímicos en las aguas subterráneas de dicha subcuenca, tales son: Bicarbonatadas Sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), Bicarbonatadas Cálcicas-Sódicas y/o Bicarbonatadas Sódicas-Cálcicas ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ y/o $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$).

De igual manera, refieren que las lagunas de origen volcánico, se pueden distinguir según dos tipos de orígenes según sus cráteres, ya sea:

- 1- Por hundimiento o colapso. Estas son siempre aguas bicarbonatadas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Na-Mg}$); así mismo, presentan una conexión estrecha con el acuífero principal que las rodea, lo que significa que conforma cuencas subterráneas esenciales más grandes, donde las lagunas sirven como pozos de grandes dimensiones, ejemplo de ellas son: Laguna Asososca, Laguna Tiscapa. Por otro lado, las lagunas que poseen agua de tipo $\text{HCO}_3\text{-Na-Mg}$ y $\text{HCO}_3\text{-Mg-Na}$; indican una relación existente con flujos de lava recientes dentro de sus cuencas.
- 2- Por erupción explosiva y catastrófica. Estas aguas son de tipo Cl-Na, son lagunas de poca extensión, de las cuales se asume que de sus cráteres fueron extraído en su mayoría tobas pomáceas (especialmente pómez dacítica), estas se denominan por su tipo como aguas profundas. Por otro lado, el deflujo subterráneo de tipo Cl-Na, en estas lagunas causa contaminación natural al agua subterránea (ejemplo de ello es la laguna de Apoyo, Masaya).

Puntualmente, dentro del área de la Subcuenca II, se pueden encontrar lagunas que presentan agua de tipo $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ y $\text{HCO}_3\text{-Na}$, estas son: Laguna de Asososca, Laguna de Acahualinca, Laguna de Tiscapa. Por otra parte, el Lago de Managua,

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

que forma el límite Norte de dicha subcuenca, es visto desde el punto de vista hidroquímico de tipo $\text{HCO}_3\text{-Na}$ predominante. Mientras tanto, las de tipo Cl-Na , es el caso de la Laguna de Nejapa, ya que se encuentra dentro de los tipos de esta clasificación, sin embargo, está presenta un proceso de desecación y por la acumulación de sedimentos no tiene escurrimiento subterráneo significativo.

Hidroquímica según JICA & INAA, (1993). En su estudio realizado para el abastecimiento de agua de Managua, con el objetivo de estimar la edad y definir el mecanismo del flujo de agua subterránea, se enfocaron en determinar la concentración de Tritio (TU). De acuerdo a sus definiciones el Tritio es un isótopo radiactivo de hidrogeno que tiene una vida de 12.3 años y la ocurrencia de Tritio en el agua del ciclo hidrológico proviene tanto de fuentes naturales como de fuentes producidas por el hombre. Así mismo, describen que el Tritio es producido en forma natural en la atmosfera terrestre debido a la interacción de neutrones producidos de rayos cósmicos con nitrógeno. Por otra parte, mencionan que la determinación de Tritio en aguas subterráneas se aplica según los siguientes contextos:

- 1- Concentraciones de Tritio muy bajas y cercanas al nivel de detectabilidad, muestran que el agua es principalmente del periodo pre-ensayos termonucleares atmosféricos, por el contrario, las concentraciones relativamente altas de Tritio indican que el agua se origina parcial o totalmente de la precipitación post-ensayos termonucleares atmosféricos.
- 2- Para poder obtener una datación precisa de tritio, se debe de tomar en cuenta los cambios en el régimen de lluvia.

Por consiguiente, detallaron que para el área de Managua el mecanismo de flujo del agua subterránea, basándose en las características zonales de los componentes químicos del agua, en las características generales de las concentraciones de Tritio y desde el punto de vista topográfico, hidrológico e hidrogeológico; el mecanismo se da de la siguiente manera:

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- 1- Las lagunas Masaya y Asososca son alimentadas verticalmente y lateralmente con aguas subterráneas provenientes del grupo Las Sierras Medio, cuyas edades geológicas se estiman entre 35 a 45 años.
- 2- El flujo subterráneo fluye por materiales del grupo Masaya, así como a lo largo de las zonas de fracturas controladas por el sistema de fallas NNE-SSO, para la cual se estima una edad de 8.5 y 4 años

Finalmente afirman que el agua subterránea almacenada en el grupo Las Sierras Medio, tiene como característica una baja renovación, al contrario del grupo volcánico Masaya, que tiene una alta capacidad de renovación.

Parámetros físico-químicos e hidroquímicos según Martínez & Chevez, (2017).

De acuerdo con los resultados de los estudios realizado por estos autores, determinaron que los valores de temperatura(T) y PH para las aguas subterráneas del Oeste del acuífero Las Sierras, se encuentran entre el rango establecidos, con T entre 18 - 30 °C y PH entre 6.5 - 8.5, las cuales son aptas para el consumo humano. Así mismo, infieren en la calidad de las aguas de acuerdo con la concentración de dureza de CaCO_3 , mencionando que estas oscilan de 0 hasta 150, clasificándolas en rangos que van desde suaves a duras, por lo que se cataloga como agua de buena calidad.

No obstante, hidroquímicamente lograron identificar que el tipo de agua predominante para esta área son las denominadas bicarbonatadas sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), por lo que es un indicativo de aguas hidroquímicas jóvenes de reciente infiltración y de poca circulación por el acuífero, ya que muestran poco enriquecimiento químico.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.3. MARCO LEGAL

2.3.1. Ley del agua

De acuerdo a la Ley N°.620, “Ley General De Aguas Nacionales”, para el territorio de Nicaragua, en su Capítulo I, denominado *Objeto y Ámbito de Aplicación*, establece lo siguiente (ANA, 2010, p.10):

Artículo 1. La presente Ley tiene por objeto establecer el marco jurídico institucional para la administración, conservación, desarrollo, uso, aprovechamiento sostenible, equitativo y de preservación en cantidad y calidad de todos los recursos hídricos existentes en el país, sean estos superficiales, subterráneos, residuales y de cualquier otra naturaleza, garantizando a su vez la protección de los demás recursos naturales, los ecosistemas y el ambiente.

Artículo 2. Son objetivos particulares de esta Ley:

- a) Ordenar y regular la gestión integrada de los recursos hídricos a partir de las cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas e hidrogeológicas del país.
- b) Crear y definir las funciones y facultades de las instituciones responsables de la administración del sector hídrico y los deberes y derechos de los usuarios, así como, garantizar la participación ciudadana en la gestión del recurso.
- c) Regular el otorgamiento de derechos de usos o aprovechamiento del recurso hídrico y de sus bienes.

De igual forma, en su Capítulo II, inciso a, *denominado Principios Rectores de los Recursos Hídricos*, cita lo siguiente: “Recurso estratégico. El agua es un recurso estratégico para el desarrollo económico y social del país. La problemática del agua es un asunto de prioridad nacional y su uso, aprovechamiento eficiente, calidad y las acciones de protección contra inundaciones y sequías, son condiciones necesarias para sustentar de manera sostenible el desarrollo económico y social y de garantizar el abastecimiento básico a las presentes y futuras generaciones”.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.4. MARCO CONCEPTUAL

2.4.1. Hidrogeología

La hidrogeología es la ciencia que estudia las aguas subterráneas, trata el origen y formación, su movimiento, reserva, características físicas, químicas y biológicas; así mismo, evalúa la interacción con los suelos y rocas, de acuerdo a su estado, sea este: sólido, líquido o gaseoso, y a través de sus parámetros evaluativos determinan las condiciones para su aprovechamiento. No obstante, la geología condiciona el funcionamiento de los acuíferos, ya que las aguas subterráneas se mueven en el interior de estas formaciones geológicas (Hispagua, 2020).

2.4.2. Agua subterránea

El agua subterránea se considera aquella existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (Navarro, 2010).

2.4.3. Acuíferos

Los acuíferos están constituidos por sistemas de rocas o formaciones geológicas, formada por una o más capas de rocas homogéneas o heterogéneas, con espacios huecos, ya sean estos poros, grietas o fracturas, llenos de agua. En general, lo que identifica una unidad acuífera o un sistema acuífero en el sentido de hacerlo diferente de otro, es que dentro de cada uno de ellos existe continuidad física del agua contenida en la zona de saturación, capaz de almacenar y transmitir al agua en cantidades importantes (Hispagua, 2020).

Sin embargo, cada uno posee características distintivas, ya sea por poseer: una permeabilidad significativa y una extensión y espesor considerables. Dos sistemas acuíferos son individualmente diferentes cuando esto no ocurre, cuando para pasar del agua de uno al agua de otro necesariamente tiene que atravesar una zona seca.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.4.4. Tipos de acuíferos

Según las descripciones de acuíferos, estos pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios:

-Según las características litológicas o tipo de huecos (Figura 9).

-Según las presiones hidrostáticas (Figura 10).

Según las características litológicas o tipo de huecos.

- **Acuíferos detríticos:** son acuíferos de rocas o sedimentos detríticos. Su permeabilidad se debe a la porosidad intergranular (de tipo primario). Si las rocas están parcialmente consolidadas o cementadas, la porosidad puede ser además de tipo secundario, por fisuración, disolución. Son todos los materiales con tamaño de grano de arena: arenas, arcosas, areniscas, gravas, conglomerados, etc.

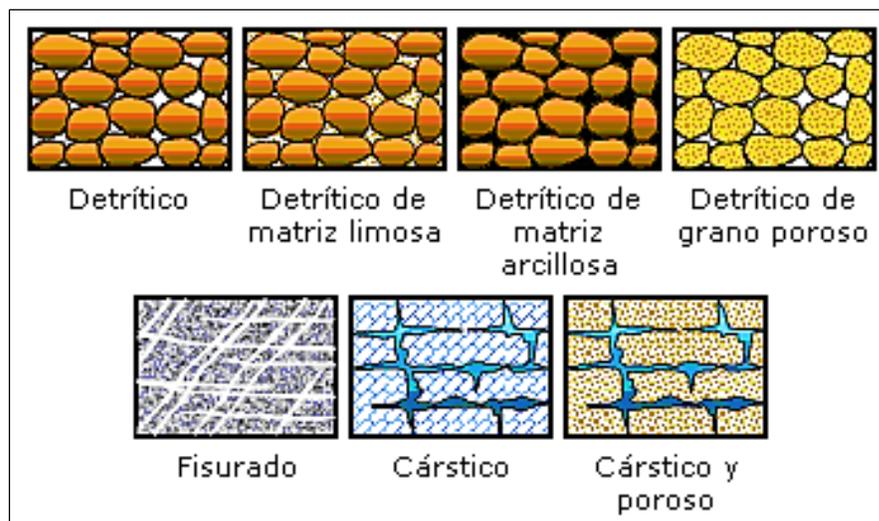


Figura 9. Tipos de acuíferos según la litología.

Fuente: <http://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia>

- **Acuíferos fisurados y/o cársticos:** se corresponden con acuíferos en rocas carbonatadas (calizas/dolomías) o bien otro tipo de rocas que presenten diaclasado, fracturación y/o disolución (rocas ígneas, metamórficas, detríticas bien consolidada). Poseen permeabilidad debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución. Se encuentran entre las

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

calizas, dolomías, yesos, granitos, basalto, siendo los dos primeros los tipos más importantes.

- **Acuíferos mixtos:** su porosidad se debe a un conjunto de todas las anteriores causas. Un ejemplo pueden ser las arenas calcáreas o calcarenitas.

Según las presiones hidrostáticas (Ordoñez, 2011, Figura 10).

- **Acuíferos libres:** también llamados no confinados o freáticos. Entre ellos existe una superficie libre y real del agua almacenada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático se encuentra la zona no saturada. La superficie hasta dónde llega el agua, se denomina superficie freática; cuando esta superficie es cortada por un pozo se habla de nivel freático en ese punto.
- **Acuíferos confinados:** Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos.
- **Acuíferos semiconfinados:** Conocidos como acuitardos. Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua, pudiendo afirmar que se trata de acuíferos a presión, pero en algunas de las capas confinantes son semipermeables.
- **Acuíferos colgados:** Se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.
- **Acuíferos multicapas:** son un caso particular (y frecuente) de acuíferos en los que se suceden niveles de distinta permeabilidad.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

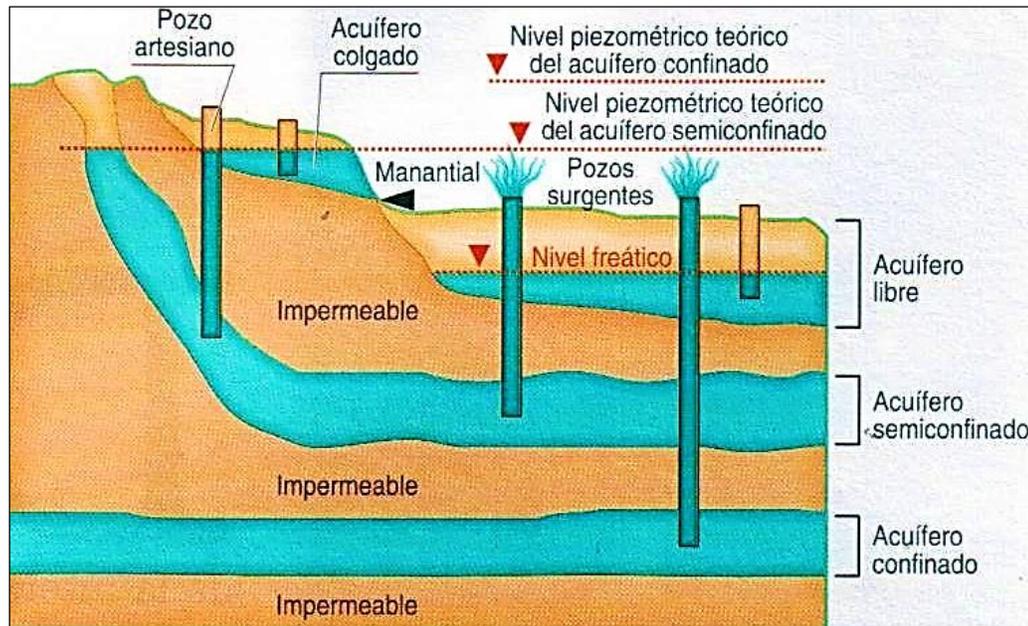


Figura 10. Tipos de acuíferos según las presiones hidrostáticas.

Fuente: Ordoñez G. J. (2011)

2.4.5. Modelo de un acuífero.

Se entiende por modelo de un acuífero el procedimiento, ya sea: analítico, matemático o analógico; los cuales permiten realizar una simulación de comportamiento. Un modelo es tanto más representativo del sistema real, cuando es capaz de reproducir más fielmente los estados del sistema, las acciones sobre él y leyes que lo relacionan (Custodio y Llamas, 1993).

2.4.6. Modelo conceptual hidrogeológico.

Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga (IDEAM, 2014).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterránea en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información de pozos, hidrogeología, geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímicas e isotópica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada. Algunos componentes de un modelo hidrogeológico conceptual.

- a) Modelo Geológico Básico: descripción geológica, unidades geológicas, unidades hidrogeológicas, corte hidrogeológico, mapa geológico, mapa hidrogeológico.
- b) Características hidráulicas: K, S, T, tipos de acuíferos, caudales de explotación, características de las captaciones.
- c) Uso del agua subterránea: uso por sectores (estadísticas), fuentes abastecedoras de acueductos.
- d) Características físico químicas del agua: tipo de agua.
- e) Afectaciones por actividad antrópicas: Actividades económicas, fuentes de contaminación.

2.4.7. Sistema de flujo subterráneo

Los Sistema de flujo subterráneo, son una unidad natural y coherente, en espacio y tiempo, consistente de aguas subterráneas de calidad físico–química particular, que circulan por materiales geológicos con una expresión geomorfológica, con vegetación y suelo particular. En éstos, se reconocen zonas, de recarga (flujo natural de agua descendente), tránsito (flujo natural del agua lateral y horizontal) y descarga (flujo natural del agua ascendente). Cada zona tiene condiciones de agua completamente diferentes y contrastantes, que es viable identificar por indicadores ambientales: suelo, geomorfología, vegetación, calidad de agua, carga hidráulica y otros (Alconada et al., 2011).

Se reconocen tres tipos de sistemas de flujos básicos que existen: local, intermedio y regional. Estos quedan definidos por la distancia y profundidad de recorrido del

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

agua que lo forma (es decir, respecto a un sitio dado, a qué profundidad el agua penetró, qué distancia recorrió y dónde termina descargando (Figura 11). Puede ser que un sitio responda en forma hidrológica a la lluvia local (sistema local) o a la lluvia ocurrida en un sitio o cuenca distante (sistema intermedio o regional).

Los sistemas se identifican considerando topografía, referente geológico, calidad y temperatura del agua. Así, se busca definir la calidad física–química del agua para postular el funcionamiento de zonas dentro de un sistema y tipo de sistema existente (Alconada et al., 2011).

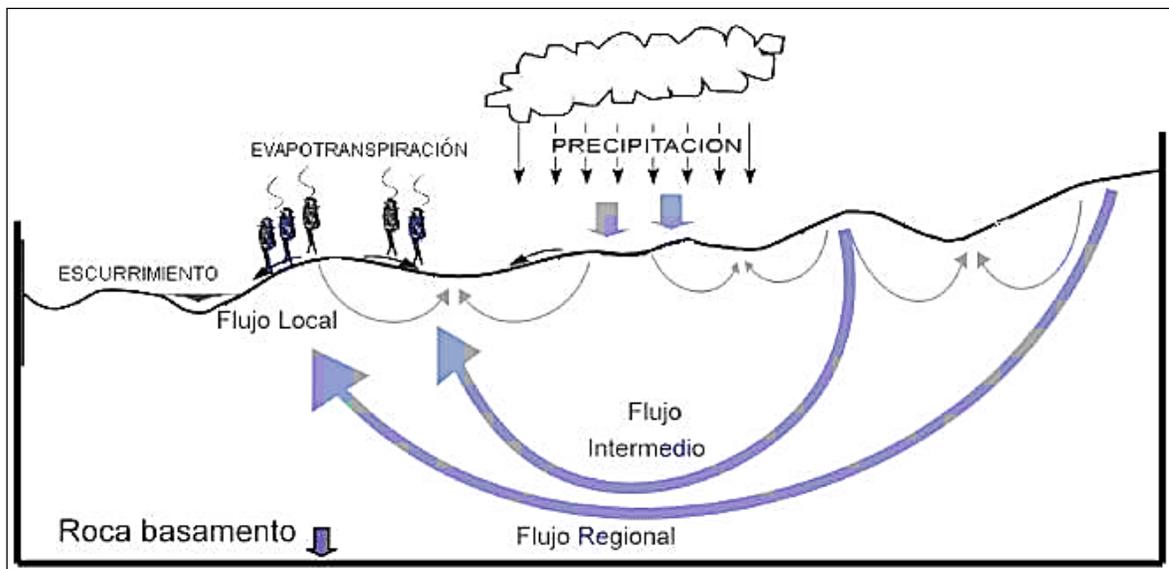


Figura 11. Sistemas de flujo subterráneo básico: Local, Intermedio y Regional.

Fuente: (adaptado de Tóch, 2000). Tomado de: Alconada, M et al. (2011).

2.4.8. La geofísica en la prospección de agua subterránea

La geofísica es una ciencia natural que utiliza los postulados fundamentales de la física para investigar el comportamiento de algunos componentes de nuestro planeta como el campo magnético, la densidad de las rocas, su capacidad para conducir la corriente eléctrica, las ondas sísmicas, el movimiento de los continentes y los fondos marinos, entre otros. Particularmente en la prospección solo se logran buenos resultados cuando existe contrastes espaciales y/o temporales marcados de la propiedad a investigar.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.4.9. Métodos electromagnéticos (EM)

Específicamente, los métodos eléctricos, suelen ser los más eficientes para determinar las características del suelo de manera somera y de alta resolución, sin embargo, debido a que estos requieren de una fuente artificial muy grande para poder alcanzar mayor profundidad en el subsuelo, se requieren de otros métodos geofísicos para poder localizar objetivos a profundidades en el orden de varios kilómetros, por lo que para solucionar estos problemas se recomienda el uso de los métodos electromagnéticos (EM), los cuales pueden profundizar a varias decenas de kilómetros utilizando fuentes controladas mucho más pequeñas o bien de uso de fuentes naturales.

Por su parte los métodos electromagnéticos (EM), pueden usar dos tipos de fuentes, las artificiales (TDEM, FDEM), donde fluye una corriente eléctrica y esta a su vez crea un campo electromagnético entorno a los medios ilimitados en extensión y profundidad donde por medio de las variaciones espaciales entre la conductividad eléctrica y la susceptibilidad magnética podemos asociar la propagación de los campos eléctricos y magnéticos en medios homogéneos. En esta técnica electromagnética donde se utiliza un transmisor/receptor, conectada a una espira grande de alambre (Loop), inyecta una corriente constante en el loop produciendo un campo eléctrico primario, la corriente es interrumpida y por Ley de Faraday se produce la inducción electromagnética de corrientes eléctricas en el subsuelo. Estas corrientes fluyen de manera cerrada viajando en profundidad y lateralmente, la intensidad disminuye con la profundidad, generando un campo magnético secundario transitorio el cual induce un voltaje variable en el receptor, el decaimiento de este voltaje contiene información de la resistividad del subsuelo (FDEM, S.f).

La descripción de cualquier campo electromagnético la podemos establecer a partir de las 4 ecuaciones de Maxwell, las cuales se muestran a continuación:

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{Ley de Faraday}) \quad 1)$$

$$\text{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{Ley de Ampere}) \quad 2)$$

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

$$\operatorname{div} D = \rho_c \quad (\text{Ley de Coulomb}) \quad 3)$$

$$\operatorname{div} B = 0 \quad 4)$$

En donde E (V/m) es el vector intensidad del campo eléctrico, D (C/m²) es el vector intensidad del flujo eléctrico, J (A/m²) el vector densidad de corriente, H (A/m) vector intensidad del campo magnético, ρ_c (C/m³) la distribución de la carga eléctrica, y B (Wb/m² o Tesla) vector densidad del flujo magnético. Además de estas expresiones, para la descripción del comportamiento de los campos electromagnéticos también se precisa de las siguientes ecuaciones constitutivas.

$$j = \sigma E \quad 5)$$

$$D = \epsilon E \quad 6)$$

$$E = \mu H \quad 7)$$

En donde ϵ (F/m) es la constante dieléctrica, μ (H/m) la permeabilidad magnética del medio, y σ (S/m) es la conductividad eléctrica (recordemos que $\rho = 1/\sigma$ con unidades de $\Omega \cdot m$). Sea $i = (-1)^{1/2}$ y $\omega = 2\pi f$ (rad/s) la frecuencia angular del campo, si ahora relacionamos todas las expresiones anteriormente descritas, y además asumimos que E y H presentan una dependencia con el tiempo de la forma

$$H(t) = H_0 e^{i\omega t} \quad 8)$$

$$E(t) = E_0 e^{i\omega t} \quad 9)$$

se obtiene que las ecuaciones básicas que describen la propagación eléctrica y magnética en un medio isótropo, lineal y homogéneo son:

$$\nabla^2 H = i\omega\mu\sigma H + \epsilon\mu\omega^2 H \quad 10)$$

$$\nabla^2 E = i\omega\mu\sigma H + \epsilon\mu\omega^2 E \quad 11)$$

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Atenuación del campo electromagnético y profundidad de penetración

En el caso de estar en un medio isótropo aislante perfecto, las ondas electromagnéticas introducidas en el terreno podrían alcanzar una profundidad indefinida. Sin embargo, este estado ideal no existe, por lo que presencia de cuerpos conductores en el subsuelo conllevan la atenuación de la amplitud de las ondas electromagnéticas. Consideremos el caso de una onda plana que se propaga por un semiespacio de conductividad σ en la dirección z hacia abajo, en donde el campo eléctrico solo presenta componente x y el campo magnético solo componente y , y ambos además con una amplitud sinusoidal con respecto z . En estas condiciones si procedemos a resolver las ecuaciones [10] y [11], la solución del campo eléctrico (análogo para el campo magnético) vendrá dada por la siguiente expresión:

$$E_x = E_0 e^{ikz} \quad 12)$$

Al término $K = (\beta + i\alpha)$ se le denomina número complejo de onda o parámetro de propagación, en donde β es el factor de fase y α el factor de atenuación.

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad 13)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad 14)$$

En el caso de materiales conductivos el factor de atenuación α se puede simplificar de la siguiente forma:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad 15)$$

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Partiendo de estas hipótesis, se define la profundidad nominal de penetración δ , también denominada profundidad Skin o profundidad efectiva, como aquella distancia para la cual la amplitud del campo se reduce a 1/e de su valor inicial. Esta profundidad δ es inversamente proporcional al factor de atenuación α .

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = 503.8 \sqrt{\frac{1}{f\sigma}} = 503.8 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad 16)$$

El Método Electromagnético en el Dominio de la Frecuencia (FDEM), implica la generación de un campo electromagnético que induce corriente en la tierra, que a su vez provoca que el subsuelo cree un campo magnético. Mediante la medición de este campo magnético, se pueden medir las propiedades y las características del subsuelo.

Esquema teórico del funcionamiento del FDEM. Los FEDM son sistemas que trabajan con un transmisor y un receptor móviles de ondas electromagnéticas. A través del transmisor, que es una bobina por la que circula una corriente alterna sinusoidal de frecuencia f (Hertz), se genera un campo electromagnético primario H_p , que se propaga libremente tanto por la superficie como por el interior del terreno. Este campo está formado por una componente magnética y otra eléctrica ortogonales entre sí, y a su vez perpendicular a la dirección de propagación de la onda (Figura 12).

En presencia de un cuerpo conductor, la componente magnética del campo primario provoca la aparición de unas corrientes inducidas, que a su vez generan un campo magnético secundario H_s . Este campo secundario, junto con el campo primario que circula libremente por la superficie del terreno, serán detectados por la bobina receptora dando lugar a un campo resultante, que diferirá tanto en fase como en amplitud con respecto al campo primario, aspecto que nos proporcionará información acerca del tamaño y conductividad eléctrica del elemento conductor.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

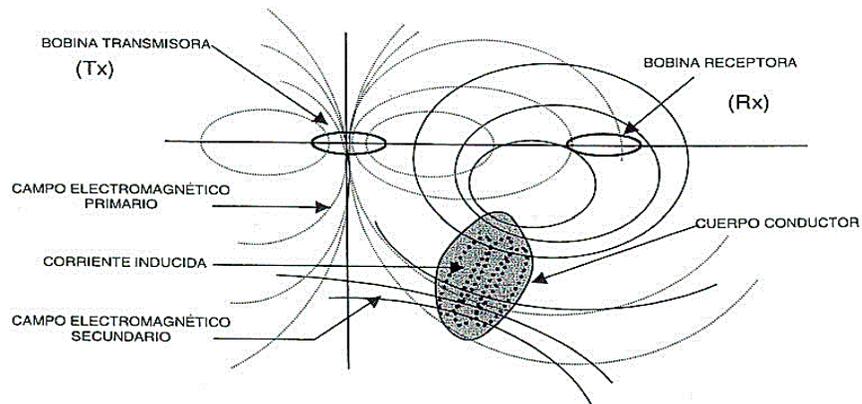


Figura 12. Esquema general del campo electromagnético (Reynolds, J., 1997).

Fuente: Estrada, L. (2012).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

2.5. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

La elaboración de un modelo conceptual de flujo de agua subterránea para la Subcuenca II de la Cuenca Sur del Lago de Managua, podría contribuir al mejoramiento de administración y distribución del recurso hídrico dentro de esta área, así mismo, ayudaría a la conservación y preservación de las aguas subterráneas en riesgo de contaminación.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

CAPÍTULO III

3.1. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1.1. Tipo de estudio

Esta investigación es de tipo descriptiva con un enfoque mixto. Es de tipo descriptiva, ya que, se enfoca en representar lo más posible a detalle, con la intención de conocer las características del medio que se estudia, de tal forma que permite indagar a través de estudios previamente realizados sobre las situaciones que ocurren en él. En este trabajo se muestra la correlación de pozos litológicos y perfiles hidrogeológicos encontradas en el área para poder definir las capas permeables y no permeables que forman la Subcuenca II de la Cuenca Sur del lago de Managua.

No obstante, se hace una representación de los tipos de flujos de agua subterránea (local, intermedia y regional), a partir de datos numéricos. Por ello, está investigación posee un enfoque mixto, ya que la realización de dicho modelo conceptual se hace mediante la recolección y análisis de procesamiento de datos tanto cualitativos como cuantitativos.

3.1.2. Universo y muestra. El universo donde se desarrolla este trabajo, es el acuífero La Sierras y la Cuenca Sur del lago de Managua. La muestra es el área de la Subcuenca II, los puntos de levantamiento geofísico y los pozos seleccionados para la creación de perfiles y correlación litológica, con el fin de describir e interpretar la disposición de las capas o estratos rocoso saturados y no saturados del área.

3.1.3. Técnicas de recolección de datos

Trabajo de gabinete. Está etapa se realizó durante todo el transcurso de la investigación, ya que como punto de inicio consistió en la recopilación de toda información de relevancia existente realizada en el área de estudio (informes, tesis, artículos, revista) trabajos de investigación estructural, de caracterización geológica e hidrogeológica, e hidroquímica, fueron las principales a tomar en cuenta.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Así mismo, se realizaron visitas a centros de documentación e instituciones como: IGG-CIGEO, INETER, ENACAL; con el fin de obtener información de trabajos realizados por dichas instituciones que fundamentara la investigación del sitio. Por otra parte, se obtuvo información espacial del área por parte de docentes investigativos. Posteriormente los datos fueron clasificados, sistematizados, evaluados y analizados para tener una organización de los datos disponibles.

Por consiguiente, se generó una base de datos SIG, la cual contiene información de tipo: estructural, litológica, hidrogeológica, hidroquímica del área de estudio, esto respecto a mapas encontrados en los artículos de investigaciones publicadas por INETER y estudios investigativos de otros autores, respectivamente referenciados. Principalmente la información litológica y estructural del área, permitió realizar una correlación de la geología local y así digitalizar un mapa geológico estructural base, para posterior ubicar puntos de interés en los que se realizarían las campañas de campo de levantamiento geofísico.

Finalmente, se realizó un registro de pozos a partir de información recopilada en las visitas institucionales e información obtenida por investigadores docentes, la cual aporta datos litológicos e hidrogeológicos. Dicha información obtenida permitió ubicar espacialmente estos pozos y poder trazar perfiles hidrogeológicos dentro del área de estudio, con el fin de describir e interpretar el subsuelo de la zona.

Trabajo de campo

A través de la planificación de campañas de campo en el área de estudio, se eligieron 15 puntos de toma de muestra para levantamiento geofísico, los cuales fueron elegidos sobre la base estructural y dirección del flujo de agua subterránea del área. Posteriormente, se obtuvo y construyó 15 perfiles de entre 100 hasta 200 metros de longitud, profundizando 300 metros en cada sitio, estos en dirección Este-Oeste dentro de la Subcuenca II, para lo cual fue necesario utilizar instrumentos tales como:

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- GPS, para la ubicación espacial de los puntos de medición (Figura 14).
- Cinta de 100 metros, para la medición del levantamiento en el arreglo de los electrodos (Figura 14).
- El Instrumento de prospección geofísica PQWT-TC, el cual emplea el método electromagnético (EM), este instrumento es un concepto completamente nuevo en cuanto a equipos electromagnéticos (Figura 15).

El levantamiento de los 15 perfiles electromagnéticos (EM) con el instrumento de prospección geofísica PQWT-TC, para la adquisición de datos, consiste principalmente en insertar en el suelo dos barras electrodos (M y N), separados a una distancia constante de 10 metros (Figura 13) unidos por un cable que se ajusta al instrumento, realizando una sucesión de medición cada 5 metros, siguiendo siempre la separación constante de los 10 metros entre cada electrodo (Imagen 1).



Fotografía 1. Medición del campo electromagnético con el equipo de prospección PQWT-TC en campo.

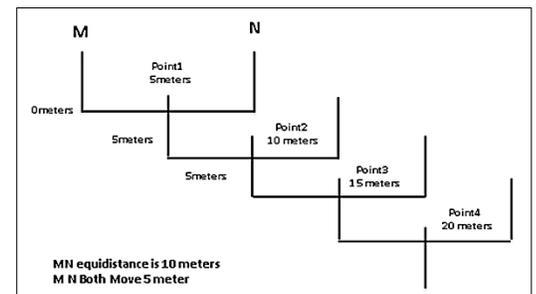


Figura 13. Esquema de medición de la separación de electrodos MN.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Instrumentos de campo



Figura 14. GPS y Cinta de medición de 100 m.



Figura 15. Instrumento de prospección geofísica de la serie PQWT-TC.

La función principal del equipo de prospección geofísica de la serie PQWT-TC, es el uso de la fuente de campo eléctrico natural como método de trabajo, en contraste con la resistividad eléctrica entre las rocas y los minerales del subsuelo o bien entre las rocas y el agua subterránea, basándose en la medición sobre la superficie del terreno de la componente del campo eléctrico natural de N frecuencias diferentes, de acuerdo a sus diferentes variaciones para estudiar cambios anormales que producen los cuerpos geológicos.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

3.1.4. Plan de análisis y procesamiento de datos e información.

Base de datos GIS (Sistemas de información Geográfica)

Mediante la utilización del Software ArcGIS 10.5, se generó una base de datos de sistemas de información geográfica, dicha base de datos cuenta con información tales como: Litología, geoestructuras del área, curvas de nivel, drenaje de la subcuenca, morfología, transmisividad, datos hidrogeológicos e hidroquímicos del área, puntos de ubicación de pozos perforados con sus profundidades y descripción litológica, así como, profundidad del agua subterránea según la medición de los pozos registrados en el inventario.

Creación de perfiles hidrogeológicos

A través de la información recopilada en la base de datos generadas en el Software ArcGIS 10.5, se constató la ubicación de 61 pozos, de los cuales solamente 26 de ellos están dentro de los límites de la Subcuenca II y cuentan con descripción litológica (Figura 17 e Inventario de pozos en la Tabla 21 en anexos). Con el propósito de poder realizar perfiles hidrogeológicos que permitieran correlacionar la información litológica de cada uno estos pozos, posterior a su clasificación, se prosiguió a trazar perfiles que siguieran la secuencia de los mismos (Figura 17). Consecutivamente, dichos perfiles fueron exportados en una base de datos Excel con sus respectivas longitudes y altitudes y coordenadas (XY), para luego ser importadas en el software Civil 3D y así realizar la representación en 2D de cómo se encuentra el subsuelo en estas zonas, no obstante, esto permitió delimitar las unidades hidrogeológicas de la zona en estudio. A continuación, en la Tabla 6, se muestra la identificación de los perfiles, su dirección de corte y longitud.

Tabla 6. Registro de perfiles hidrogeológicos.

| ID Perfiles | Dirección del corte | Longitud (m) | Sección Longitudinal |
|-------------|---------------------|--------------|----------------------|
| Perfil 1 | S-N | 4,550 | A-A' |
| Perfil 2 | S-NE | 9,170 | B-B' |
| Perfil 3 | E-NO | 9,530 | C-C' |
| perfil 4 | O-E | 11,510 | D-D' |
| Perfil 5 | S-N | 8,134 | E-E' |
| Perfil 6 | S-N | 10,116 | F-F' |

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Interpretación de la descripción litológica de pozos

La correlación de pozos se realizó a través de la utilización del Software Civil3D 2018 y AutoCAD 2D 2018, donde se diseñaron los 26 pozos que se encuentran dentro del área de estudio, cada pozo de acuerdo a su profundidad, elevación y con sus respectivas descripciones técnicas de perforación.

Debido a que dichos pozos solamente cuentan con descripción geotécnica fue necesario interpretar de acuerdo al ambiente volcánico representativo del área de estudio, para lo cual se tomó en cuenta el tipo de material descrito, la ubicación de los pozos, la geología regional-local del área y las características comunes de las secuencias estratigráficas conocidas para el área de Managua.

No obstante, para realizar la correlación entre pozos, fue necesario homogenizar y agrupar en unidades hidrogeológicas la información de cada pozo, de acuerdo al análisis granulométrico y litológico, por consiguiente, se procedió a plasmar estas unidades en cada sección hidrogeológica del área en estudio (ver descripción de pozos en anexo).

Delimitación de unidades hidrogeológicas

Seaber, (1986-1988), definió una unidad hidroestratigráfica como un cuerpo de roca que se distingue por su porosidad y permeabilidad. Por otra parte, Copeland et al. (2009), afirma que la unificación y delimitación de las mismas están dadas en base a sus características hidrogeológicas observables (citado de Monreal et al., 2010).

Por lo anterior, para poder definir las unidades hidrogeológicas o hidroestratigráficas del área de estudio, fue necesario delimitarlas en base a las características hidrogeológicas recuperada de cada pozo, relacionando estos paquetes de rocas y sedimentos entre sí, agrupándolas en paquetes litológicos característicos a partir sus propiedades hidrogeológicas inferidas, características físicas distintivas de cada unidad (contenido lítico, granulométrico, ya sea homogéneo o heterogéneo), límites verticales y horizontales de acuerdo a su profundidad y elevación, finalmente a través de las secciones hidrogeológicas y la correlación de los pozos seleccionados para este estudio, se establecieron las principales unidades encontradas en el área.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Interpretación de datos geofísicos

La geofísica efectuada en este trabajo está establecida por el método eléctrico de prospección, que se basa en el estudio de campos de potencial eléctrico natural, y debido a que seleccionamos varios o decenas de componentes de campo eléctrico de varias frecuencias como parámetro de medición, se denomina método de selección de frecuencia de campo eléctrico natural. Puntualmente, la técnica electromagnética de prospección del subsuelo se basa en la medida y el análisis del comportamiento de los campos magnéticos inducidos en el terreno mediante impulsos de corriente de cierta intensidad.

De acuerdo a lo anterior descrito, para este trabajo de investigación, se utiliza el método electromagnético (EM), mediante el cual permite asignar en el subsuelo una resistividad aparente (impedancia) de muy buena resolución vertical y lateral, en donde la profundidad de penetración del efecto electromagnético (EM) alcanza los 300 metros en cada perfil. La adquisición de datos se obtiene mediante la aplicación del equipo en campo, para el cual los electrodos M, N, conectados, a través del campo magnético del cable a tierra, donde la señal eléctrica ingresa, después de la amplificación de intercambio de la anti interferencia, con la selección de frecuencia operacional deseada, genera los datos desde el procesador central (CPU) del equipo, obteniendo así los resultados del levantamiento para ser procesados.

Para el presente trabajo se realizaron 15 perfiles electromagnéticos dentro del área de estudio (Figura 17), con el fin de establecer la profundidad del agua subterránea y espesor de las unidades hidrogeológicas, en su mayoría orientados con dirección Oeste-Este, con longitudes de entre 80 a 215 m, no obstante, dichos levantamientos se realizaron aplicando 40 frecuencias en la ventana de 27Hz-170Hz, garantizando una profundidad de investigación de 300 metros. Dichos perfiles EM se muestran en la Tabla 7, con sus respectivas coordenadas, nombre de identificación, altitud y longitud. Posteriormente a la aplicación del método, se obtienen los valores ploteados en un gráfico de curva, representando valores desde los más altos a los bajos de las resistividades rocosas, así mismo, se obtienen dos mapas de proceso, los cuales brindan información del estado del subsuelo (Figura 16).

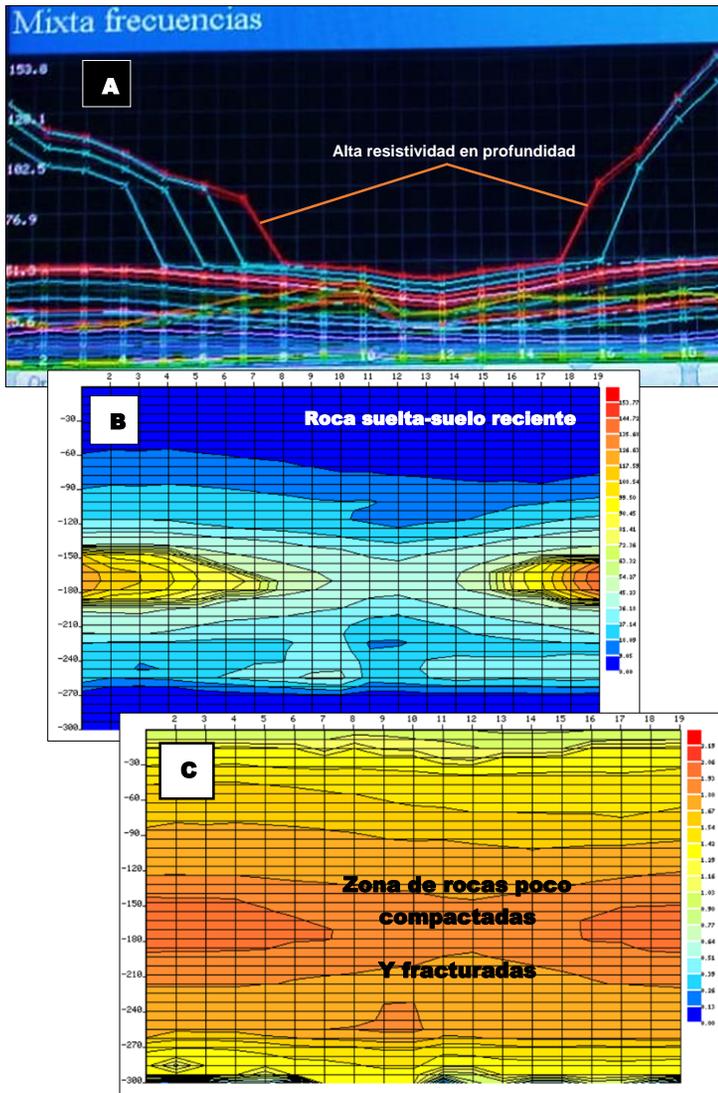


Figura 16. Gráfico de curva y mapas procesados de los perfiles EM.

En la **Figura 16**, se pueden ver los datos registrados por el instrumento, para el cual se aplicó diferentes frecuencias o frecuencias mixtas, las áreas de diferente contraste representan el potencial eléctrico en milivoltios (mV), las cuales aumentan desde los 120 m hasta 210 m. Específicamente, la **Figura 16-A**, muestra la curva generada del levantamiento EM, las líneas rectas indica la homogeneidad del material rocoso en el subsuelo, los ángulo de cambio en la curva indica la variación de las propiedades de las rocas en profundidad, donde se da un cambio de materiales.

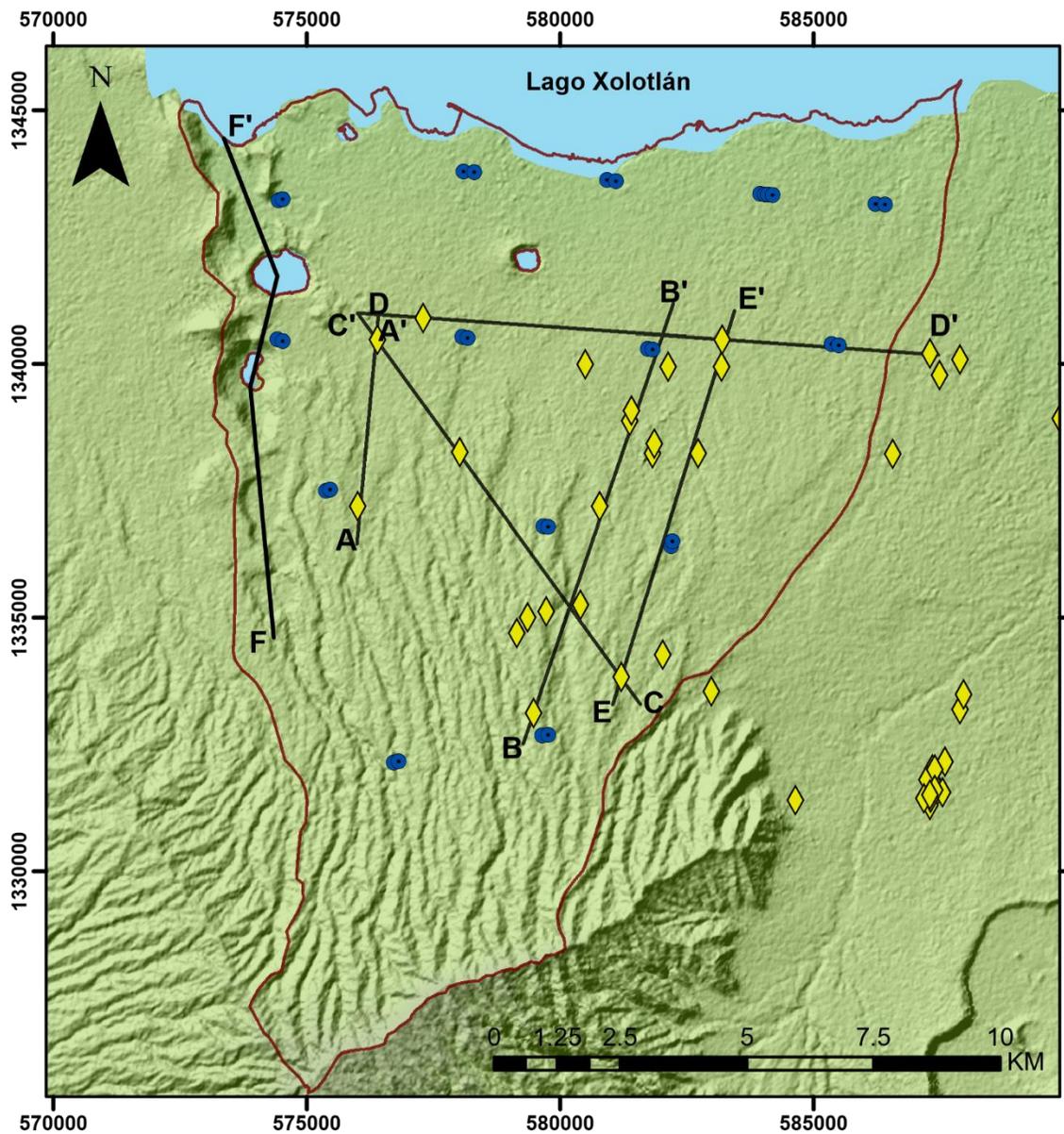
En la **Figuras 16 - B y C**, las líneas horizontales indica la distancia en metros tomada en superficie, la cual es representada por cuadrículas de un metro, mientras la vertical indica la profundidad alcanzada en metros (300 m). Los mapas de contorno B y C, representan la distribución y la variación de roca en el subsuelo hasta los 300 m, el esquema de los rangos de valores representada por colores en la parte derecha de cada mapa, indica el potencial eléctrico de las rocas en milivoltios (mV).



Donde la variación de los colores determina las unidades hidroestratigráficas, de acuerdo a la litología del área y según la interpretación hidrogeológica de las unidades. Los colores más fuertes, como el rojo y rojo-naranja determinan la resistividad de una roca masiva, compactada y con poca o nula circulación de agua subterránea.

Tabla 7. Levantamiento de perfiles electromagnéticos (EM)

| Perfiles EM | Coordenadas | | | | Localización | Z(h)INICIO | Z(h)FINAL | Long(m) |
|----------------|-------------|---------|--------|---------|---------------------------------------|------------|-----------|---------|
| | Inicio | | Fin | | | | | |
| | Este | Norte | Este | Norte | | | | |
| PEM1 | 574447 | 1343222 | 574529 | 1343245 | Los Martínez | 537.9 | 594.81 | 85 |
| PEM2 | 578096 | 1343792 | 578310 | 1343781 | MITRAB | 552.53 | 308.92 | 215 |
| PEM3 | 580926 | 1343632 | 581107 | 1343604 | Bo. Los Pescadores | 58 | 70 | 185 |
| PEM4 | 583951 | 1343357 | 584050 | 1343341 | Bo. Selim Shible (Carretera Norte) | 68 | 71 | 100 |
| PEM5 | 584102 | 1343341 | 584196 | 1343331 | Bo. Selim Shible (Carretera Norte) | 72 | 70 | 95 |
| PEM6 | 586226 | 1343149 | 586412 | 1343137 | Poder Judicial (Carretera Norte) | 66 | 67 | 200 |
| PEM7 | 574423 | 1340488 | 574525 | 1340447 | Colonia Molina | 149 | 146 | 110 |
| PEM8 | 585366 | 1340393 | 585506 | 1340367 | Colegio República Villa Venezuela | 127 | 131 | 155 |
| PEM9 | 581733 | 1340300 | 581829 | 1340281 | Polideportivo España | 132 | 129 | 100 |
| PEM10 | 578073 | 1340537 | 578178 | 1340515 | Rotonda El periodista | 131 | 135 | 110 |
| PEM11 | 575383 | 1337499 | 575457 | 1337525 | Bo. Camilo Ortega | 265 | 268 | 80 |
| PEM12 | 579671 | 1336795 | 579761 | 1336783 | Villa Foresta Sur- Managua | 290 | 331 | 100 |
| PEM13 | 576721 | 1332137 | 576811 | 1332169 | Pochocuape - Las Mercedes | 500 | 501 | 100 |
| PEM14 | 579652 | 1332670 | 579767 | 1332682 | Intermezzo del Bosque | 507 | 512 | 130 |
| PEM15 | 582190 | 1336410 | 582222 | 1336505 | Lomas de Santo Domingo | 273 | 271 | 100 |





UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA

UNAN-MANAGUA

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA
INGENIERIA EN GEOLOGIA**

"Modelo conceptual de flujo de agua
subterránea de la Subcuenca II, Cuenca Sur
de Managua"

Elaborado por:
Br. Erika Judith Sánchez Alemán.

SIMBOLOGÍA

- ◆ Pozos con litología
- Perfiles Electromagnéticos (EM)
- Puntos de medición EM
- Perfiles Hidrogeológicos
- ☾ Lago y Lagunas

E. 1: 140,000

**Sistema de Coordenadas UTM
Datum WGS 1984, Zona 16N**

Figura 17. Mapa de ubicación de perfiles hidrogeológicos, electromagnéticos y pozos con litología.

CAPÍTULO IV

4.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.1. Geología de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua

Tomando en cuenta la descripción de la litología de Managua de acuerdo a la revisión bibliográfica, para definir la geología de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, se ha elaborado un mapa geológico unificado de escala 1:80,000 que muestra las principales unidades y estructuras dentro del área de estudio (Figura 18). Dicho mapa se realizó conforme a la información del mapa geológico de la porción central y Sur del campo volcánico Nejapa, elaborado por Avellán, (2009), el cual abarca un perímetro de 74.5 km², que incluye la ubicación de los 19 volcanes monogenéticos (conos de toba, maar, y conos de escoria) y sus respectivos depósitos, siendo esta zona el límite Oeste del área de estudio (Figura 51, ver en anexo).

No obstante, la geología del área Sur, Norte, Noreste y centro de la Subcuenca II, se presenta conforme al “*Mapa Geológico de Managua y sus alrededores*”, de escala 1:50,000, definido por INETER (2007), (Figura 52, ver en anexo). De acuerdo con el mapa geológico de Managua, el subsuelo del área urbana de Managua y sus alrededores, está compuesto básicamente de dos agrupamientos de rocas fragmentarias de procedencia volcánica. El más antiguo, la formación Las Sierras, constituido principalmente por rocas piroclásticas de los periodos Plio-Pleistoceno, el cual se considera el basamento de la región. El segundo paquete de rocas, de edad más reciente, se conoce como Grupo Managua y cubre al anterior, constituido por productos volcánicos y materiales sedimentarios transportados recientes, a los que se les asigno con época Holoceno (geología según, Kutterolf et al., 2007).

De manera general el mapa geológico del área de estudio, se encuentra dividido en tres formaciones: Las Sierras, depósitos pertenecientes a Chiltepe, Managua y la secuencia del occidente de Managua: Ticomio, Nejapa y Asososca, las cuales han sido descrita anteriormente a detalle.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

No obstante, en dicho mapa, se muestran 4 secciones longitudinales que han sido construidas con el único propósito de correlacionar las unidades hidrogeológicas con los depósitos establecidos en el mapa geológico del área de estudio, por ello, estas secciones presentan la misma dirección de corte que poseen las secciones hidrogeológicas, mostrando así una perspectiva más amplia que facilita el estudio y delimitación de las unidades hidrogeológicas.

A continuación, en la Tabla 8, se muestran los datos de los perfiles geológicos de correlación, con datos de: longitud de corte, dirección y su identificación. Asimismo, en la Figura 19 y Figura 20, se pueden observar estos cortes en representación 2D.

Tabla 8. Perfiles geológicos de correlación

| ID Perfiles | Dirección del corte | Longitud (m) | Sección Longitudinal |
|--------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Perfil 1 | S-N | 4,550 | A-A' |
| Perfil 2 | S-NE | 9,170 | B-B' |
| Perfil 3 | E-NO | 9,530 | C-C' |
| Perfil 4 | S-N | 10,116 | D-D' |

Figura 19 y Figura 20. Representan la secuencia de los perfiles hidrogeológicos trazados para la correlación de pozos dentro del área en estudio, mediante el cual se realiza una comparación de los depósitos que cortan dichos perfiles según el mapa geológico de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua.

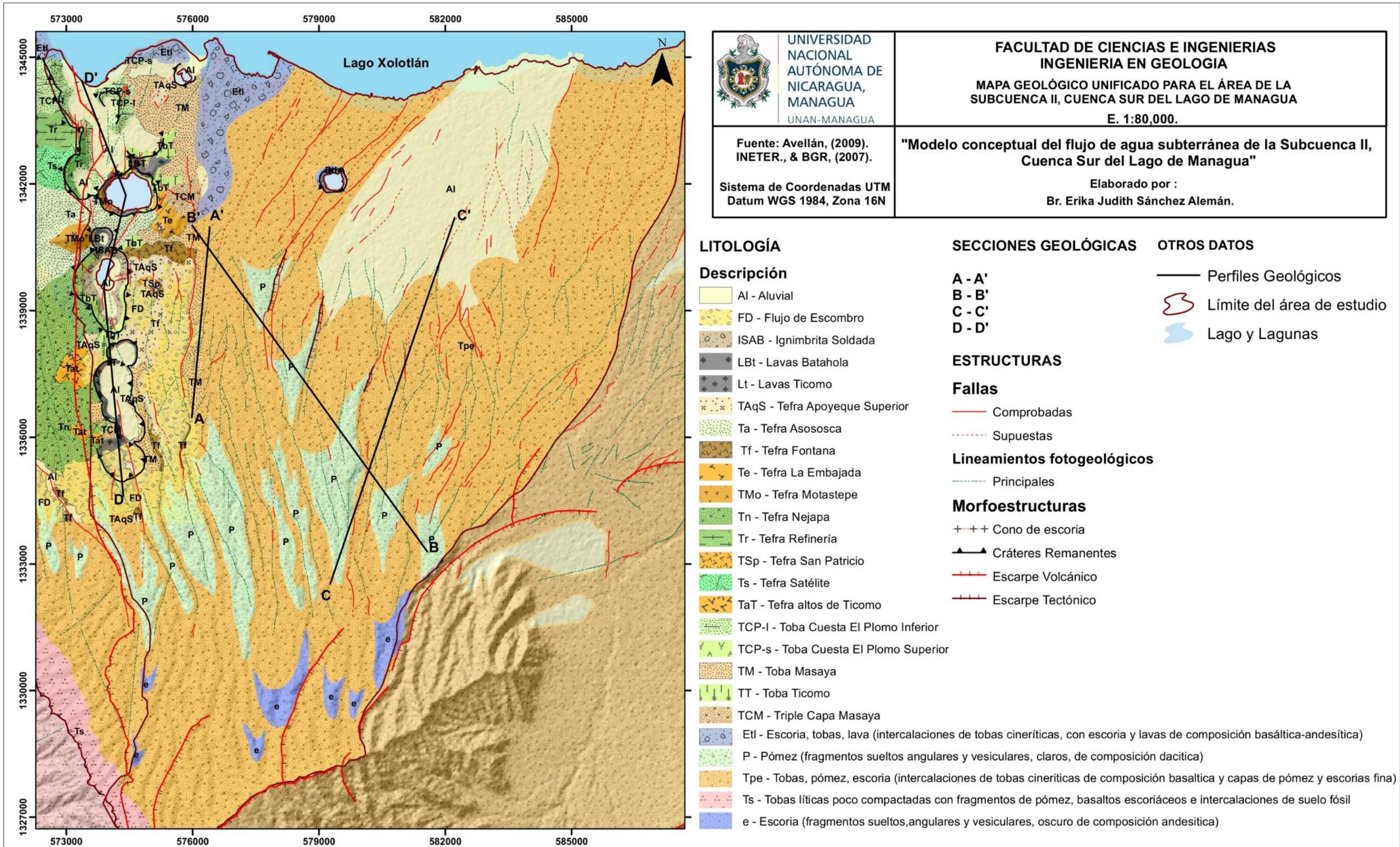


Figura 18. Mapa geológico del área de estudio.



Secciones geológicas para el área de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua.

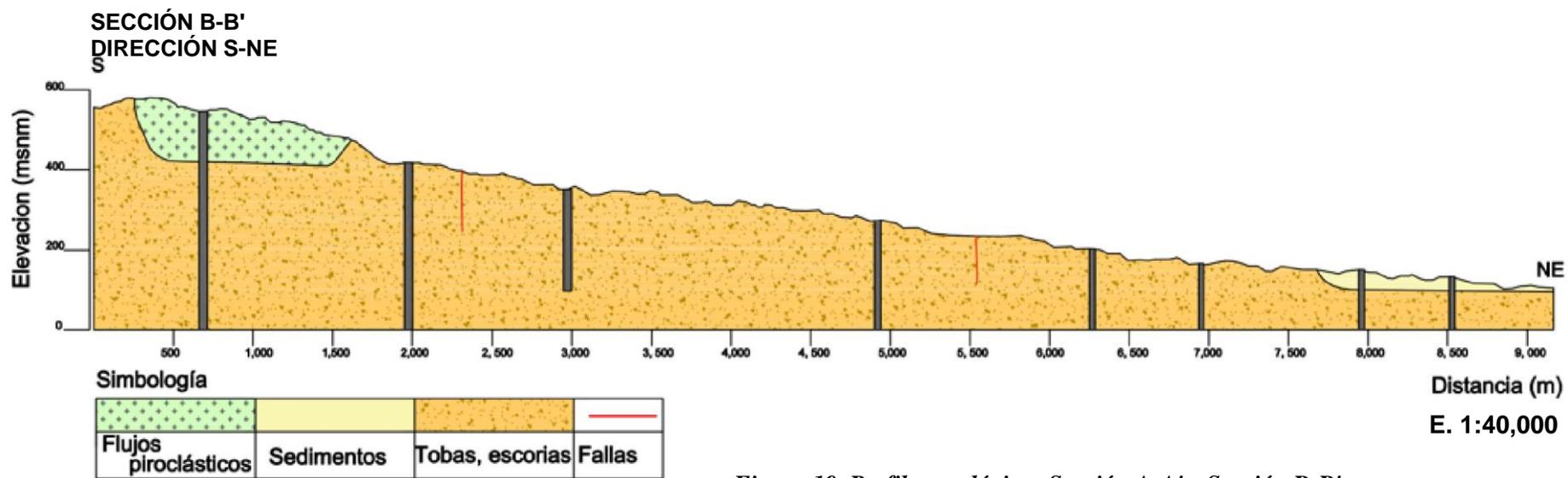
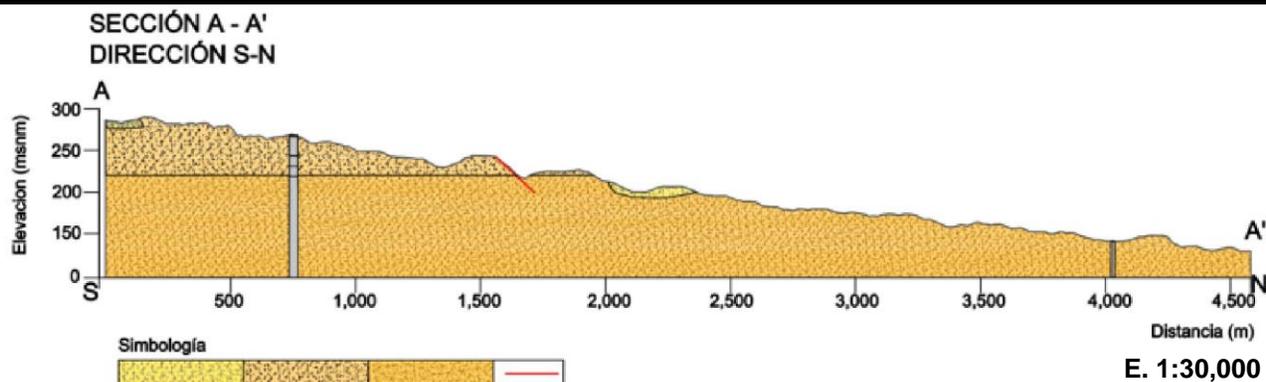
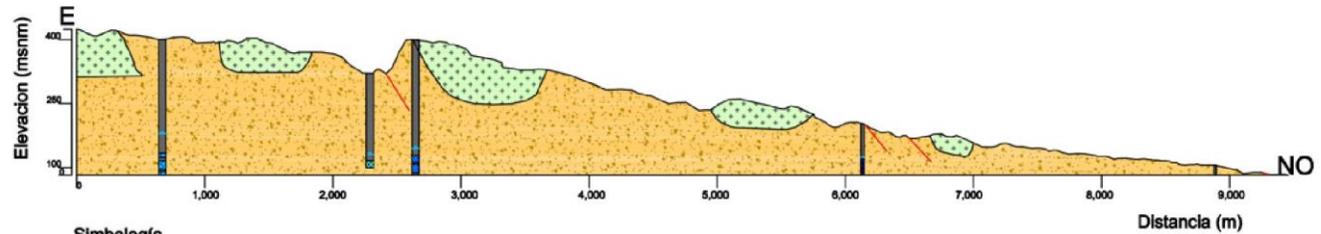


Figura 19. Perfiles geológicos Sección A-A' y Sección B-B'.



Secciones geológicas para el área de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua.

SECCIÓN C- C'
DIRECCIÓN E-NO

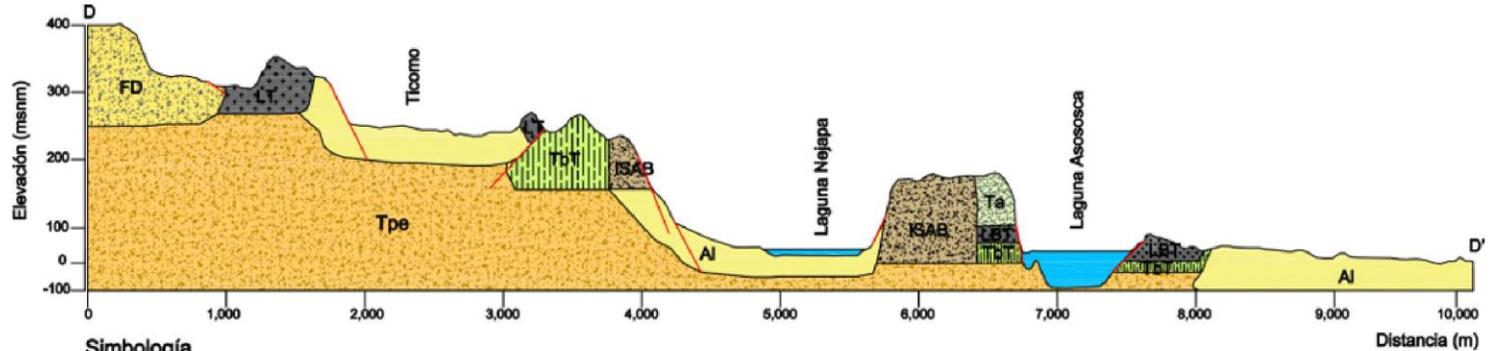


Simbología

| | | |
|----------------------|-----------------|--------|
| | | |
| Flujos piroclásticos | Tobas, escorias | Fallas |

Distancia (m)
E. 1:50,000

SECCIÓN D - D'
DIRECCIÓN S-N



Simbología

| | |
|--|-----------------------------|
| | Al - Aluvial |
| | FD - Flujo de escombros |
| | LT - Lavas Ticomó |
| | TbT - Tobas Ticomó |
| | Ta - Tefra Asososca |
| | LBT - Lavas Batahola |
| | ISAB - Ignimbrita Soldada |
| | Tpe - Tobas, pómez, escoria |

Distancia (m)
E. 1:55,000

Figura 20. Perfiles geológicos Secciones C-C' y Sección D-D'.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Los principales depósitos litológicos en el área de estudio están identificados como: Etl(Escoria, tobas, lava), P(Pómez), Tpe(Tobas, pómez y escoria), Ts(perteneciente al grupo Las Sierras, constituidos por tobas líticas), la unidad e (de escorias) y en el extremo Noroeste de la subcuenca se ubican los depósitos descritos por Avellán, (2009), los pertenecientes a la Formación Nejapa (Véase Capítulo II, Sección 2.2.5).

- Unidad Etl, este depósito se encuentra distribuido en cierta parte de la subcuenca, en el extremo Noroeste, el cual está compuesto por escorias, tobas y lavas de composición basáltica, granulométricamente estos productos presentan arenas, limos y arcillas. El origen de estos productos es atribuido a caída área y flujos lávicos de composiciones indiferenciadas, no obstante, están asociados a la Formación Nejapa, específicamente la comprendida en la secuencia que lleva el mismo nombre.
- Unidad de Pómez, cubre ciertas partes de la región centro-Sur de la subcuenca, son depósitos de caída y de flujos piroclásticos, atribuidos a la secuencia Apoyeque, en el cual predominan los productos de composición dacítica-riodacíticas.
- Unidad Tpe, la cual según la geología base del área de Managua, se encuentra distribuida en la mayoría de las áreas de la subcuenca, estos depósitos son reconocidos como depósitos de caída área y flujos piroclásticos, de composición basáltica toleítico pertenecientes a la Formación Managua, especialmente a los depósitos generados por las erupciones de la Calderas Masaya, características por poseer arenas y cenizas gruesas.
- Unidad e, la cual es característica por estar constituida por paquetes de escoria negra, se encuentran aflorando en el extremo Sur de la subcuenca, en la parte alta montañosa. Dicha unidad es atribuida a la secuencia de la tefra Fontana, presentando composición basáltica toleítico. Dicha secuencia es ubicada como la unidad superior del Grupo Las Sierras.
- Unidad Ts, esta unidad está constituida por tobas y suelos (tobas meteorizadas, tobas aglomeráticas masivas), dichos depósitos son atribuidos

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

a flujos piroclásticos y flujos de lodo, de composición indiferenciada, perteneciente al Grupo Las Sierras de edad Plio-Pleistoceno.

A continuación, en la Figura 21, se muestra la secuencia estratigráfica propuesta por Kutterolf et al. (2007) y Pardo et al. (2008), para la ciudad de Managua.

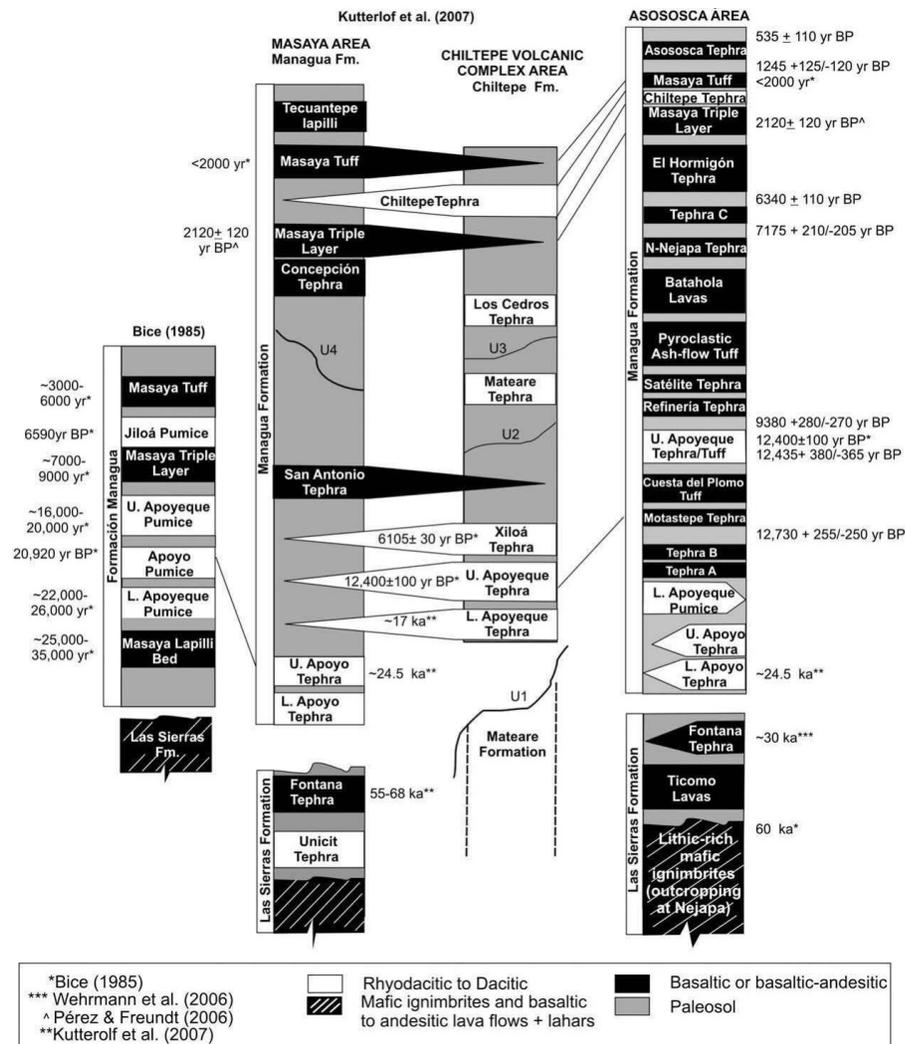


Figura 21. Secuencia estratigráfica para el área de Managua.

Fuente: Kutterolf et al. (2007), Pardo et al. (2008).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

4.1.2. Hidrogeología de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua.

Identificación de unidades hidrogeológicas (UHG)

Una unidad hidrogeológica es aquella en que las propiedades hidráulicas (porosidad, permeabilidad y capacidad de infiltración) son similares, se definen a partir de la observación litológica y estructural en campo, para poder así definir la influencia que estas tienen sobre el flujo de agua subterránea, así mismo, el límite de una unidad hidrogeológica puede no corresponder a los límites de las unidades o formaciones geológicas, esta última mencionada puede contener una sola o más unidades Hidrogeológicas.

Por lo anterior expuesto, para desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual en el área de estudio se realizó una caracterización hidrogeológica a partir de la información litológica de pozos como principal dato de entrada, lo cual permitió clasificar e identificar unidades hidrogeológicas de acuerdo a: génesis del material, permeabilidad y porosidad inferida, características físicas distintivas (contenido de lítico, granulometría, contenido de limo, entre otros) y el estado de consolidación descrito para cada depósito. En la Figura 22, se muestran los datos de las propiedades físicas de los distintos tipos de suelos según la clasificación Alemana.

| Textura de suelos | Coefficiente de permeabilidad K_f [m/s] | Rangos de permeabilidad [m/s] | Clasificación |
|-------------------|---|-------------------------------|---------------------------|
| Grava | $10^{-1} - 10^{-2}$ | $10^{-2} < K_f$ | Muy fuertemente permeable |
| Arena gruesa | $10^{-2} - 10^{-3}$ | $10^{-2} > K_f > 10^{-4}$ | Fuertemente permeable |
| Arena media | $10^{-3} - 10^{-4}$ | $10^{-4} > K_f > 10^{-6}$ | Permeable |
| Arena fina | $10^{-4} - 10^{-5}$ | $10^{-5} > K_f > 10^{-8}$ | Poco permeable |
| Limo arenoso | $10^{-5} - 10^{-7}$ | $K_f < 10^{-8}$ | Muy poco permeable |
| Limo arcilloso | $10^{-6} - 10^{-9}$ | | |

Figura 22. Permeabilidad por grupo de textura de suelos.

Fuente: Saucedo, U. (2003)

La clasificación de las características físicas del suelo según su permeabilidad, se muestra como una condicionante para determinar los límites de unidades hidrogeológicas del área, no obstante, por ubicarse en una zona volcánica activa dentro del contexto geológico, la geometría de los acuíferos queda controlada principalmente por los contrastes de permeabilidad entre los distintos materiales

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

volcánicos, así como por el manto de coladas de lavas y depósitos piroclásticos. Así mismo, en zonas proximales a los centros de emisión volcánicos pueden encontrarse productos piroclásticos con poca permeabilidad, ejemplo de ello pueden ser las tobas líticas y compactadas, las cuales se pueden encontrar entre capas de coladas de lavas más permeables y actúan a modo de barrera horizontales.

De acuerdo con Custodio y Llamas, (1983), la porosidad de las rocas volcánicas es muy variable según el tipo de roca y su origen de formación, las cuales pueden variar debido a la heterogeneidad del medio. Los porcentajes de porosidad van de entre 10% a 30% para coladas de barro y clastos volcánicos, y de 30 a 50% en rocas piroclásticas, mientras en lavas masivas nada vesiculares pueden alcanzar un valor de un 5% de porosidad. Sin embargo, estas porosidades en rocas volcánicas pueden variar con el pasar del tiempo, ya que, los procesos de meteorización y colmatación o compactación reducen significativamente el volumen de huecos en las rocas. Por otra parte, las rocas de composición basáltica a intermedia, presentan mayor permeabilidad que las rocas acidas, y las lavas jóvenes son más permeables que las antiguas. En la Tabla 9 se muestran los valores de permeabilidad para rocas volcánicas.

Tabla 9.

Permeabilidad de las rocas volcánicas

| Clasificación de rocas volcánicas | Rangos de permeabilidad |
|---|-------------------------------|
| Materiales piroclásticos | 10^{-2} m/día. |
| Coladas de lava | 150 m ² /día |
| Basaltos antiguos | >1500 m ² /día |
| Basaltos modernos o jóvenes | 1000 m ² /día |
| Tobas basálticas y basaltos compactados | 100 - 700 m ² /día |
| Andesitas | 5000 m ³ /día. |
| Piroclastos con intercalaciones de aluviones y depósitos lacustre | 1000 - 300 m ² día |

Según Davis (1969), Heindl (1965), Wozab y Jovel (1970), & Lau (1967).

Fuente: Citado de Custodio y Llamas (1983).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Para la comprensión de las unidades hidrogeológicas se debe tener claro que los pozos en rocas volcánicas pueden, a veces, dar caudales espectaculares con descensos mínimos, pero en la misma formación y a escasa distancia pueden ser prácticamente estériles, esto debido a la variabilidad deposicional de los materiales.

A través de la interpretación de las columnas litológicas de pozos recopiladas dentro del área de estudio, se presentan a continuación los resultados de las correlaciones que determinan las unidades hidrogeológicas del área, así como los resultados de la elaboración de los perfiles hidrogeológicos, tomando en cuenta la ubicación de los pozos.

De acuerdo a lo anterior para el área de estudio se clasificaron 5 unidades hidrogeológicas o hidroestratigráficas las cuales se encuentran compuestas por: depósitos piroclásticos de flujo, depósitos piroclásticos de caída, flujos lávicos, y depósitos lacustres compuestos por arenas, limos y arcilla.

Unidades hidroestratigráficas o hidrogeológicas de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua.

Unidad 1. Depósitos no consolidados. Formado principalmente por depósitos lacustres. Estos están compuestos por limos, arenas limosas, arenas finas a medias, suelos fósiles, arena media a gruesa semicompactada, arenas con fragmentos de escoria y pómez.

Unidad 2. Depósitos pobremente consolidados. Constituidos por piroclastos de caída, suelos fósiles, cenizas, tobas arenosas semicompactadas, arenas gruesas a media semicompactadas, escoria y arena intercalada.

Unidad 3. Depósitos moderadamente consolidados. Formados por combinación de depósitos piroclastos de caída y de flujos. Compuestos por tobas meteorizadas como tobas limosas con escoria, tobas limosas andesitas, tobas arenosas gruesas con limolita e intercalaciones de paleosuelos. Así mismo, presenta tobas compactadas e ignimbritas con fragmentos angulares.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Unidad 4. Depósitos parcialmente a moderadamente consolidados. Formados por depósitos de flujo piroclástico. Estos depósitos están caracterizados por la presencia de tobas líticas o aglomeráticas semicompactadas a compactadas, tobas aglomeradas fracturadas, andesitas con intercalaciones de toba arenosa, andesitas fracturadas, arenas gruesas compactadas con fragmentos angulares, capas de arena gruesa compactada con limos y finalmente, tobas compactadas con intercalaciones de arena gruesa con fragmentos angulares de escoria.

Unidad 5. Depósitos consolidados. Formado principalmente por depósitos de lava. Compuesta por depósitos de composición basáltica a andesítica, con capas de escoria basáltica, tobas andesitas compactadas y en algunos casos con intercalación de andesitas fracturada.

Características hidrogeológicas de la sección A-A'.

Este perfil se encuentra con dirección S-N, ubicado en la parte media Oeste de la Subcuenca II. Su punto de inicio se localiza entre Bo. Camilo Ortega y San Isidro Libertador proyectado hasta el Bo. Altagracia, con una extensión de 4,550.2 m. Según la geología estructural del área esta sección no corta fallas significativas, solamente un lineamiento comprobado, perteneciente al lineamiento Sur de la falla Estadio.

En esta área según el registro de pozos solamente se cuenta con información litológica de dos pozos, de los cuales se realizó el perfil hidrogeológico. En la Tabla 10, se muestran los datos específicos de cada pozo ubicado en la sección A-A'.

Tabla 10.

Sección A-A' Dirección S-N

| No | Coordenadas UTM WGS84 | | Prof. (m) | Elevación (msnm) | Agua subterránea (msnm) | Nombre |
|--------|--------------------------|---------|-----------|---------------------|----------------------------|-----------------|
| | Este | Norte | | | | |
| Pozo 1 | 576010 | 1337190 | 335 | 268 | 61.83 | Sierra Maestra |
| Pozo 2 | 576402 | 1340478 | 228.6 | 142 | 43 | Bertha Calderón |

Fuente: Inventario de pozos.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

De acuerdo a la clasificación definida de unidades hidrogeológicas para el área de la Subcuenca II, la primera columna litológica del pozo Sierra Maestra se encuentra dividido por las unidades 2, 3 y 4. La Unidad 2, se localiza en su parte superior hasta los 106.7 m de profundidad; Unidad 3, en su parte media con un espesor de 103.6 m; En su base presenta rasgos correspondientes a la Unidad 4, con un espesor de 124.6 m, siendo esta última la unidad que conforma el espesor saturado de este pozo.

Pozo Bertha Calderón, éste solamente presenta rasgos característicos pertenecientes a la Unidad 3 y Unidad 4. La Unidad 3, se encuentra desde la parte superior descendiendo hasta los 126.52 m; Mientras en su base se encuentra constituido por la Unidad 4 desde los 126.5 m hasta los 102 m de profundidad, con un espesor total de 118.9 m, el cual se presenta como un espesor saturado en su totalidad.

Con referencia a los datos de espesor saturado presente en las unidades anteriores, se puede inferir que el acuífero en esta área se encuentra constituido principalmente por la Unidad 4 y en mínima parte superior por la Unidad 3, el cual presenta 13 m de espesor saturado en su parte inferior variando a hasta los 19 m según la topografía. Por lo anterior, el espesor saturado aproximado es de 156.7 m, donde la dirección del flujo de agua subterránea se encuentra orientada hacia el Norte.

En general las características presentes en esta secuencia litológica se encuentran divididas por las siguientes unidades: Unidad 2. De depósitos pobremente consolidados: constituidos por toba con arena gruesa a media semicompactada, limolita y escoria, arenas finas y medias. Unidad 3. Depósitos moderadamente consolidados: compuesto por tobas arenosas gruesas, limolitas arenosas gruesas con intercalaciones de suelo fósil. Unidad 4. Depósito parcialmente a moderadamente consolidado: compuesto por tobas arenosas gruesas compactadas con fragmentos angulares y escorias. A continuación, en la Figura 23, se muestra la correlación realizada para esta misma secuencia.

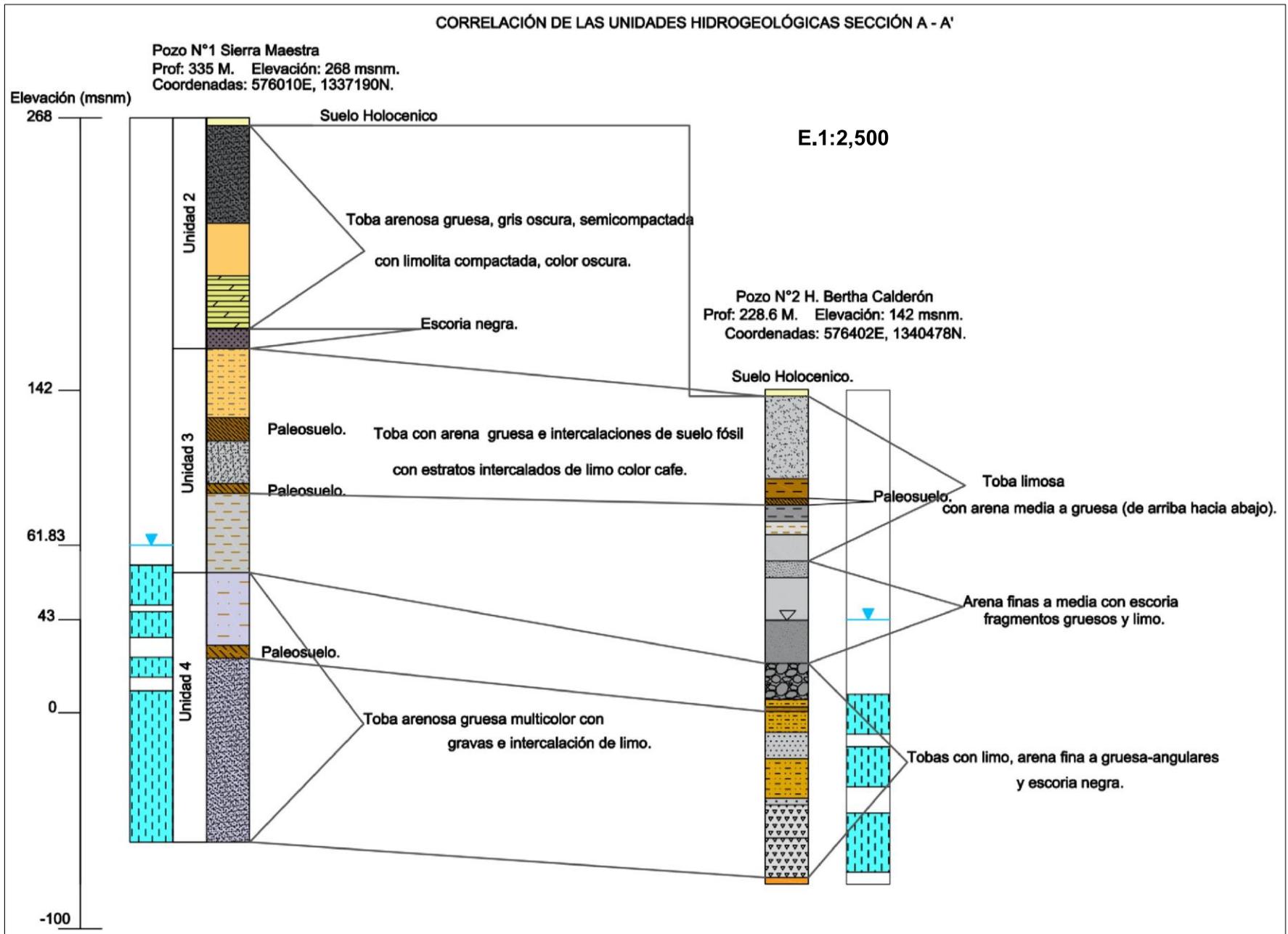


Figura 23. Correlación de litología de pozos-perfil 1.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Características hidrogeológicas de la sección B-B'.

Este perfil se encuentra proyectado con dirección S-NE hacia el lago de Managua, abarcando la parte media y media alta de la Subcuenca II, específicamente su punto de inicio se localiza en Intermezzo del Bosque y su punto final se encuentra entre el Bo. Carlos Fonseca Amador y Residencial El Dorado, con una extensión de 9,170.30 metros. Según la geología estructural del área, a esta sección la cortan dos fallas supuestas atribuidas a la Falla Centro América.

Para el análisis de las unidades hidrogeológicas de esta área se cuenta con información litológica de 8 pozos con profundidades y elevaciones variadas. En la Tabla 11, se muestra la identificación, los valores de altitud, profundidad, coordenadas, profundidad del nivel del agua subterránea de la secuencia de pozos ubicados en la sección B-B'.

Tabla 11.

Sección B-B' Dirección S-NE

| No | Coordenadas UTM | | Prof. (m) | Elevación (msnm) | Agua subterránea (msnm) | Nombre |
|---------|-----------------|---------|--------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | WGS84 | | | | | |
| | Este | Norte | | | | |
| Pozo 3 | 579485 | 1333110 | 509 | 503 | 92 | Alpes N°4 |
| Pozo 4 | 579147 | 1334686 | 411.48 | 415 | 105 | Las viudas |
| Pozo 5 | 580400 | 1335250 | 247.87 | 346 | 130 | Sn. Isidro de la Cruz Verde |
| Pozo 6 | 580787 | 1337188 | 335.37 | 260 | 82.76 | Villa Panamá |
| Pozo 7 | 581867 | 1338422 | 274.4 | 205 | 82 | Km 7.5 C. Masaya |
| Pozo 8 | 581414 | 1339081 | 274.4 | 173 | 108 | Centro América N°4 |
| Pozo 9 | 582140 | 1339940 | 213.4 | 145 | 64.72 | H. Manolo Morales |
| Pozo 10 | 583204 | 1340478 | 193 | 138 | 148 | Nicarao N°3 |

Fuente: Inventario de pozos.

En esta secuencia de pozos están presentes todas las unidades hidroestratigráficas de la Subcuenca II, las cuales se describen a continuación:

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Unidad 1. Depósitos no consolidados, en esta área se encuentra constituida por: suelos residuales o recientes, paleosuelos, capas de limo intercaladas con arena fina a media, capas de arena fina y media, así como tobas arenosas con fragmentos de pómez. Dicha unidad está presente en los pozos San Isidro de la Cruz Verde, Villa Panamá, Hospital Manolo Morales y Nicarao n°3 en una mínima parte superior.

- Pozo San Isidro de la Cruz Verde, la Unidad 1 está presente desde su base constando con un espesor de 110 m (de abajo hacia arriba), siendo esta unidad el principal acuífero de explotación para este pozo, sin embargo, solamente 34.6 m representan el espesor saturado de la unidad.
- Pozo Villa Panamá, dicha unidad está presente desde la parte superior hasta su parte media, abarcando 200 m de espesor, presentando 36 m de espesor saturado en su base.
- Pozo Hospital Manolo Morales, en este pozo el agua subterránea se encuentra casi superficial a los 61 m de profundidad, la unidad 1 en este pozo está presente casi en su totalidad, con 153 m de espesor, donde 99 m están saturados. Finalmente, el pozo denominado Km 7.5 C. Masaya, solamente presenta en su parte superior 28 m de la unidad, sin saturación de agua.

Unidad 2. Depósitos pobremente consolidados: en esta sección, esta unidad se encuentra compuesta por arenas, tobas con abundante escoria, capas de tobas semicompactadas con arena y escoria. Dicha unidad está presente en los pozos Las viudas y San Isidro de la Cruz Verde. Sin embargo, la unidad no es muy representativa, ya que, sus espesores en los pozos son muy superficiales, abarcando 73 hasta 137.8 metros sin saturación de agua.

Unidad 3. Depósitos moderadamente consolidados: esta unidad solamente se encuentra presente en el pozo Alpes n°4, constando de tobas limo arenosas con escoria, tobas limosas andesíticas con escoria, andesita con escoria e intercalaciones de tobas limosas. Con espesores de 165.54 m en su parte superior y 82.72 m de espesor en su parte inferior, constituyendo el espesor saturado del área (en la base).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Por lo antes mencionado, esta unidad es representativa, así no se encuentre en los demás pozos, debido a que conforma el espesor saturado de dicho pozo.

Unidad 4. Depósito parcialmente a moderadamente consolidado: esta unidad se encuentra en la mayoría de los pozos que forman la sección B-B'. Tales son: Pozo Las Viudas, Villa Panamá, Km 7.5 C. Masaya, y Centro América n°4, Hospital Manolo Morales y Nicarao N°3, presentando una secuencia de tobas aglomeráticas compactadas y semicompactadas, andesitas fracturadas, arena gruesa compactada con fragmentos angulares, capas de arena gruesa compactadas con intercalaciones de limos y tobas compactadas con intercalaciones de arena gruesa.

Una característica importante que resalta a esta unidad, es que en la mayoría de los pozos se presenta como un espesor saturado, el cual varía en profundidades según la topografía y el cambio de los depósitos de material, mostrando espesores de 100 hasta los 200 m saturados.

Unidad 5. Depósitos consolidados. Esta unidad se presenta conformada por tobas andesíticas compactadas, andesitas basálticas con abundante escoria y en paquete de lavas escoriáceas basálticas masivas. Estas características hidrogeológicas se encuentran en los pozos Alpes n°4 y Las Viudas, con espesores de 260 m en el primer pozo y 192.5 m en el segundo.

De manera general, la secuencia presenta tres niveles de agua subterránea, el más superficial a los 130-148 msnm, uno intermedio entre 110-130 msnm y el último de 80-110 msnm, los cuales están constituidos principalmente por la unidad 4 y el nivel superficial es dominado por la unidad 1. La dirección de flujo en esta secuencia se da con dirección Norte.

En la Figura 24, se representa la clasificación de las unidades hidrogeológicas para la sección B-B'.

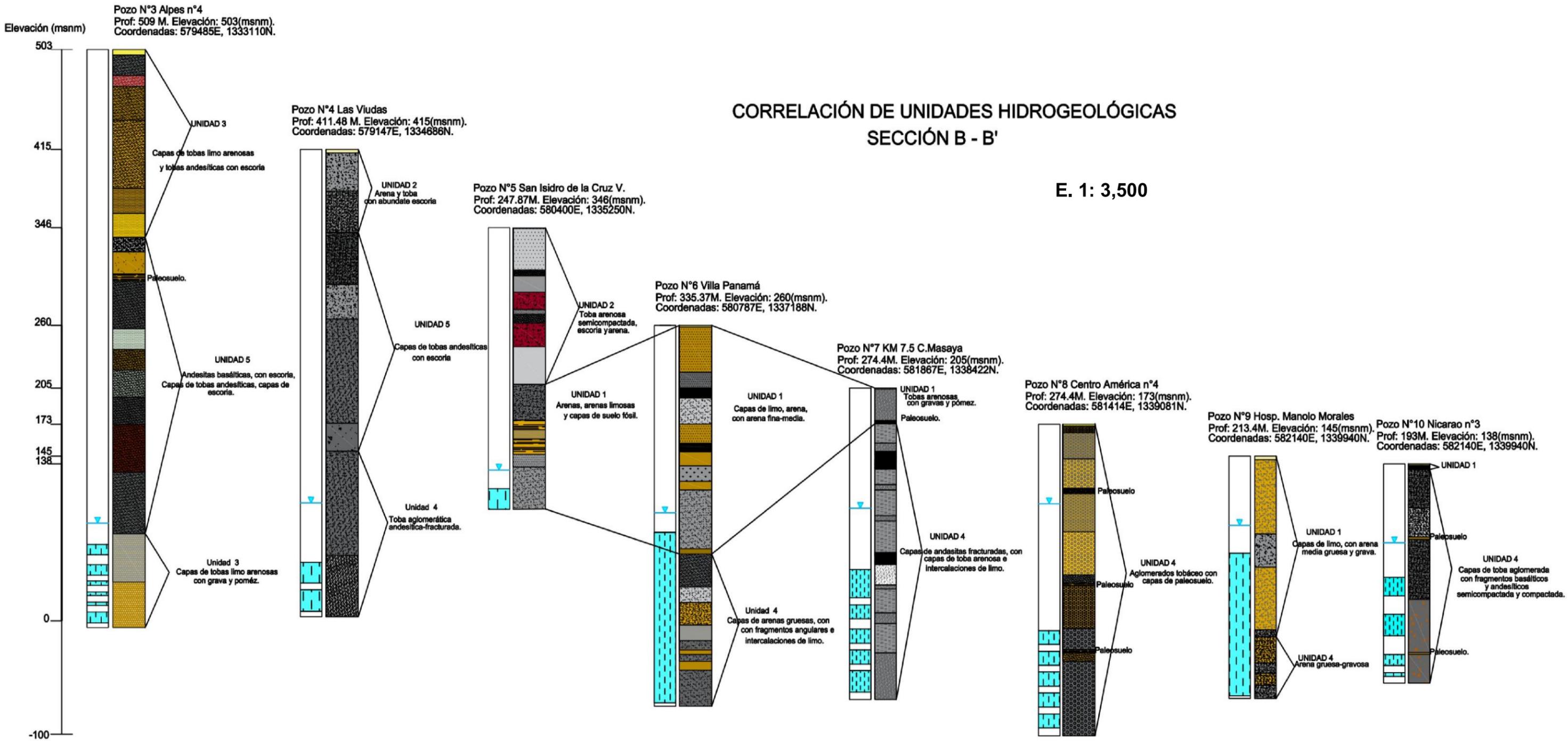


Figura 24. Correlación de litología de pozos-perfil 2.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Características hidrogeológicas de la sección C-C'.

La sección C-C', se encuentra orientada con dirección E-NO, proyectado de manera perpendicular cortando el área central de la Subcuenca II, con una extensión de 9,530 metros, su punto de inicio se localiza en Bosques de San Isidro proyectado hasta el Bo. Batahola Sur. Para el análisis de este corte se contó con información hidroestratigráfica de 5 pozos, entre ellos algunos interpolados que se cruzan pertenecientes a las secciones B-B' y A-A', tales son: pozo San Isidro de la Cruz Verde y Bertha Calderón. No obstante, los pozos que se agregan a la secuencia son: Bosques de San Isidro, Alpes n°2 y Memorial Sandino.

Por lo antes mencionado solamente se describirán los pozos agregados a la secuencia, ya que los otros han sido descritos anteriormente. De manera general, la sección C-C', presenta rasgos hidrogeológicos pertenecientes a las unidades 1, 2, 3, y 4. Las unidades hidrogeológicas 1 y 2 están presente solamente en el pozo San Isidro de la cruz Verde.

La unidad hidrogeológica 3 de depósitos moderadamente consolidados, está conformada por los materiales encontrados en el pozo Bosque de San Isidro con un espesor de 226 m, superpuesto a la unidad 4. Por otro lado, esta misma unidad se encuentra en el pozo Alpes n°2 con 140.8 m de espesor, subyaciendo a la unidad 4 y en su parte superior se superpone con 31 m de espesor compuestos por tobas meteorizada.

No obstante, en el pozo Memorial Sandino dicha unidad se encuentra en su máximo espesor con 256.86 m. De forma general, en esta secuencia la unidad 3 está constituida por: tobas meteorizadas, tobas limosas con arena, tobas limosas con escoria, tobas limosas andesíticas con fragmentos angulosos, tobas arenosas gruesas y limolitas arenosas fina-gruesa con escoria.

Unidad 4. Depósitos parcialmente a moderadamente consolidados, está presente en la base del pozo Bosques de San Isidro subyaciendo a la unidad 3, con un espesor de 154.8 m y en el pozo Alpes n°2 se presenta en su parte media con 210 m de espesor.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Las características litológicas de esta unidad para esta secuencia están marcadas por: capas de tobas compactadas, andesitas fracturadas, tobas aglomeráticas, andesita con matriz de grano grueso y escoria, tobas arenosas gruesas compactadas con fragmentos angulares y escorias, en su mayoría por material lítico.

Finalmente, de manera general el flujo subterráneo se presenta en espesores saturados que varían desde 34 m a 122 m, pertenecientes a las unidades hidrogeológicas 4 y 3.

En la Tabla 12, se muestran los valores de altitud, profundidad, altitud del agua subterránea y coordenadas de los pozos pertenecientes a la sección C-C’.

Tabla 12.

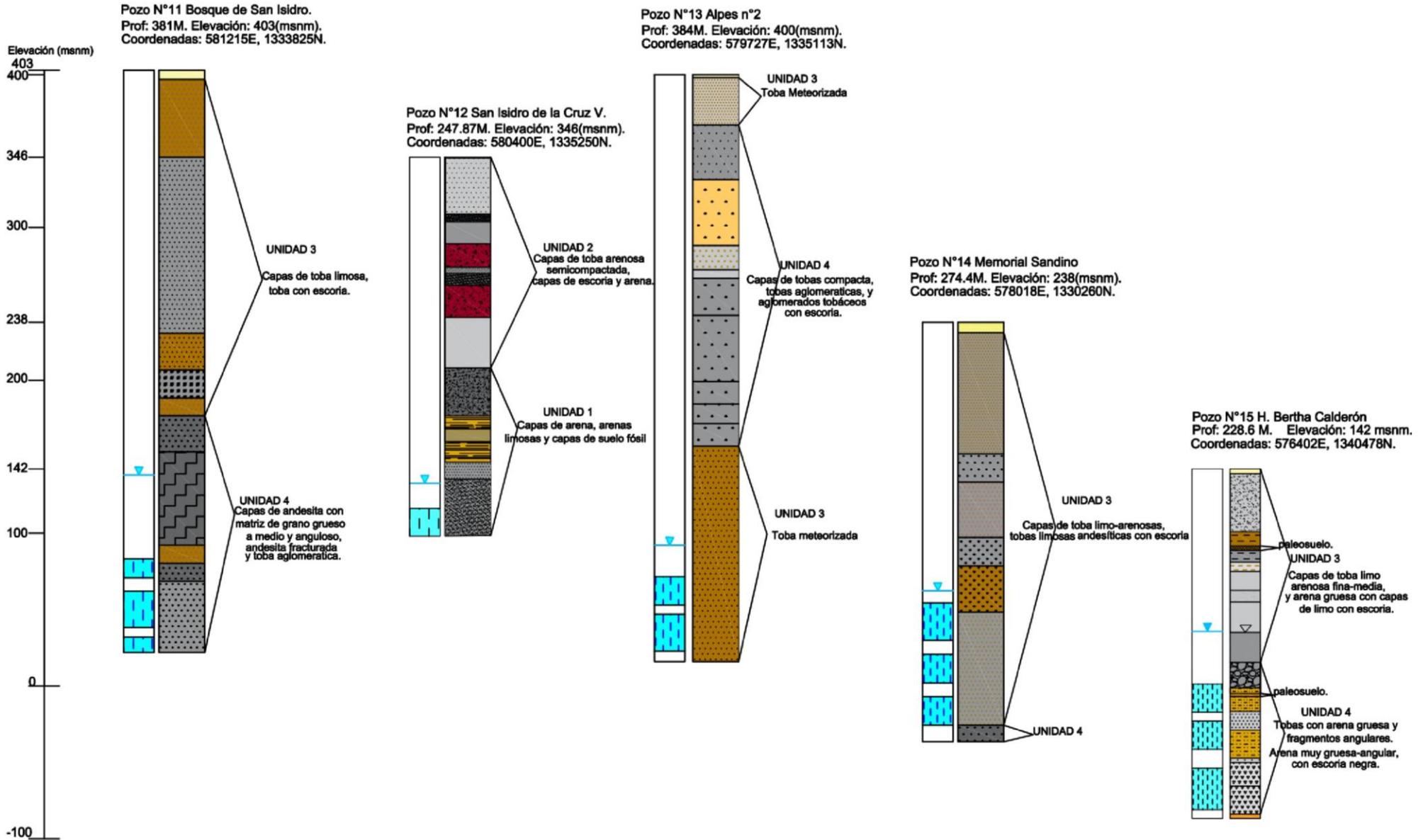
Sección C-C’ Dirección E-NO

| No | Coordenadas UTM | | Prof. (m) | Elevación (msnm) | Agua subterránea (msnm) | Nombre |
|---------|-----------------|---------|--------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | WGS84 | | | | | |
| | Este | Norte | | | | |
| Pozo 11 | 581215 | 1333825 | 381 | 403 | 128 | Bosques de Sn. Isidro |
| Pozo 12 | 580400 | 1335250 | 247.87 | 346 | 130 | San Isidro de la Cruz Verde |
| Pozo 13 | 579727 | 1335113 | 384 | 400 | 92.2 | Alpes N2 |
| Pozo 14 | 578018 | 1330260 | 274.4 | 238 | 45.17 | Memorial Sandino |
| Pozo 15 | 576402 | 1340478 | 228.6 | 142 | 43 | Bertha Calderón |

FUENTE: Inventario de pozos.

En la Figura 25, se muestra la correlación realizada en la sección C-C’, para determinar la secuencia y límites de las unidades y así ser representadas en los perfiles hidrogeológicos.

**CORRELACIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
SECCIÓN C-C'**



E.1:3,500

Figura 25. Correlación de litología de pozos-perfil 3.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Características hidrogeológicas de la sección D-D'.

La sección D-D', se encuentra proyectado con dirección E-O, el cual atraviesa una secuencia de 6 pozos, algunos de ellos interpolados, cortando de manera horizontal la parte baja de la Subcuenca II, desde el Oeste en el Bo. Batahola Sur hasta el extremo Este de Sabana Grande, con una extensión de 11,509.5 metros. Siendo este perfil el de mayor extensión, sin embargo, por su posición topográfica no cuenta con elevaciones mayores a los 160 (msnm). En la Tabla 13, se muestra el registro de pozos que conforman esta sección.

Tabla 13.

| Sección D-D' Dirección E-O | | | | | | |
|----------------------------|--------|---------|--------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Coordenadas UTM WGS84 | | | | | | |
| No | Este | Norte | Prof. (m) | Elevación (msnm) | Agua subterránea (msnm) | Nombre |
| Pozo 16 | 576402 | 1340478 | 228.6 | 142 | 43 | Bertha Calderón |
| Pozo 17 | 577300 | 1340900 | 213.4 | 143 | 54.6 | René Cisneros |
| Pozo 18 | 580501 | 1339994 | 213.4 | 156 | 73.2 | Altamira n°5 |
| Pozo 19 | 582140 | 1339940 | 213.4 | 145 | 64.72 | Hospital Manolo Morales |
| Pozo 20 | 583204 | 1340478 | 193 | 138 | 148 | Nicarao N°3 |
| Pozo 21 | 587299 | 1340201 | 244 | 121 | 62 | Sabana Grande n°2 |

Fuente: Inventario de pozos.

El pozo René Cisneros y el pozo Sabana Grande se encuentran constituidos principalmente por la unidad 1. Mientras por su parte, el pozo Altamira n°5 presenta 111.4 m de espesor de la unidad 2 y 102 m correspondientes a la unidad 3, siendo este el espesor saturado para este pozo.

De manera general esta sección se encuentra conformada por las unidades hidrogeológicas 1, 2, 3, y 4:

Unidad 1. Depósitos no consolidados: presentando arenas medio finas, arenas finas a gruesas, paleosuelos, arenas limosas, capas de limo.

Unidad 2. Depósitos pobremente consolidados: presentando tobas compactadas, tobas con escoria semicompactadas, capas de arena gruesa y fragmentos angulares. Unidad 3. Depósitos moderadamente consolidados: Capas de toba limo arenosa-finas a medias, capas de arena gruesa con escoria. Unidad 4. Depósitos parcialmente a moderadamente consolidados: la cual para esta área presenta tobas aglomeráticas cementadas y semicompactadas, tobas con arena gruesa y fragmentos de escoria. **En la Figura 26**, se muestra la correlación litológica de pozos para la limitación de las unidades hidrogeológicas de la sección D-D'.

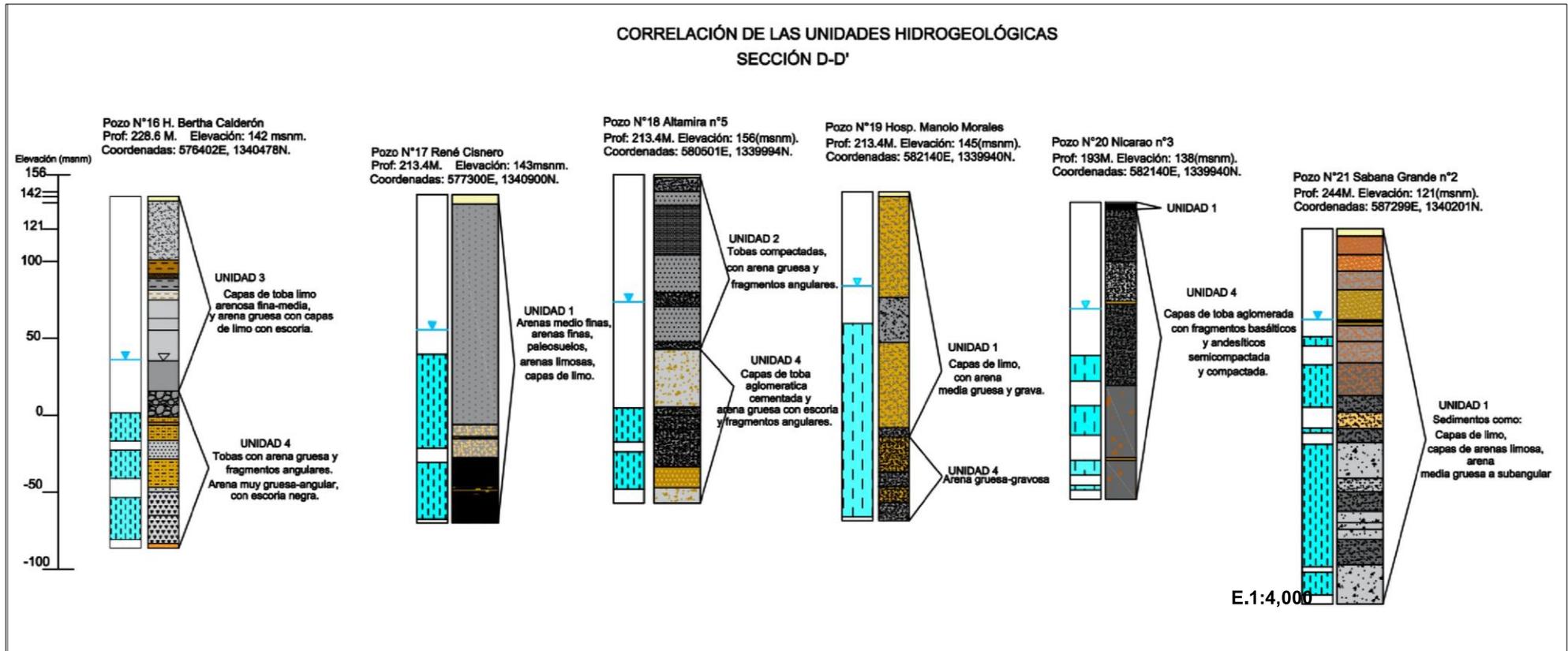


Figura 26. Correlación de litología de pozos-Perfil 4.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Características hidrogeológicas de la sección E-E'.

La sección E-E', se encuentra proyectada con dirección S-N, atravesando de manera vertical el costado Este de la Subcuenca II, su punto de inicio se localiza al Sur de Bosques de San Isidro hasta la parte baja de la Subcuenca en Rubenia, con una distancia de 8,134.32 metros. Esta sección cuenta con información hidroestratigráfica de 8 pozos, de los cuales se han interpolados 5 pozos encontrados en las secciones B-B', C-C' y D-D', tomando en cuenta la cercanía de los mismos. Por lo tanto, solamente se describen los pozos agregados a esta secuencia. En la Tabla 14, se muestran los datos de elevación, profundidad, elevación del agua subterránea, coordenadas e identificación de los pozos pertenecientes a esta sección.

Tabla 14.

Sección E-E' Dirección S-N.

| No | Coordenadas UTM WGS84 | | Prof. (m) | Elevación (msnm) | Agua subterránea (msnm) | Nombre |
|---------|-----------------------|---------|-----------|------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Este | Norte | | | | |
| Pozo 22 | 581215 | 1333825 | 381 | 403 | 128 | Bosques de San Isidro |
| Pozo 23 | 582027 | 1334259 | 365 | 370 | 113.84 | La Hoyada |
| Pozo 24 | 580787 | 1337188 | 335.37 | 260 | 82.76 | Villa Panamá |
| Pozo 25 | 581867 | 1338422 | 274.4 | 205 | 82 | Km 7.5 C. Masaya |
| Pozo 26 | 582724 | 1338232 | 243.84 | 205 | 86.32 | 18 de Mayo |
| Pozo 27 | 582140 | 1339940 | 213.4 | 145 | 64.72 | Hospital Manolo Morales |
| Pozo 28 | 583191 | 1339938 | 189 | 155 | 18 | Colonia 14 de Septiembre |
| Pozo 29 | 583204 | 1340478 | 193 | 138 | 148 | Nicarao N°3 |

Fuente: Inventario de pozos.

Pozo Hoyada presenta materiales piroclásticos de flujo y lavas de composición andesítica con escorias, por lo que en él se han delimitado las unidades 5 y 3. Por otro lado, el pozo 18 de Mayo, se encuentra conformado por las unidades 2 y 4, donde el espesor saturado corresponde a la última unidad mencionada. Finalmente, el pozo 14 de Septiembre, está constituido por la unidad 1 y 4, donde la unidad 4 conforma el espesor saturado con 126 metros.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

De manera general, en esta sección se encuentra presentando las 5 unidades presentes en la Subcuenca II. El flujo de agua subterránea se presenta con dirección hacia el Norte, variando de profundidad según la topografía, entre más elevado más profundo.

En la Figura 27, se presenta la correlación de las unidades hidrogeológicas de la sección E-E'.

Características hidrogeológicas de la sección F-F'.

Debido a que, en el área Oeste, perteneciente a la secuencia Nejapa, de la Subcuenca II, no se cuenta con registro litológico de pozos, se realizó una correlación de la litología presente en el área, de acuerdo con la información geológica estudiada por Avellán (2009), correspondiente a la presente en el mapa geológico del área de estudio. Distinguiendo así, depósitos aluviales, piroclásticos de caída, flujo y lavas según las características establecidas para la clasificación de las unidades hidrogeológicas, las cuales se han descrito anteriormente. Por lo anterior, solamente se muestra el perfil hidrogeológico producto de dicha correlación, el cual está orientado con dirección S-N (hacia el lago), y cuenta con una longitud de 10,116 metros. (Figura 30)

De manera general, las unidades hidrogeológicas presentes en la sección F-F' son la unidad 1, 3, 4 y 5. Unidad 1, está conformada por depósitos aluviales y lacustres. La unidad 3, está constituida por depósitos de flujo, de tobas pertenecientes a Ticomo y tefras de Asososca. Unidad 4, formada principalmente por tobas aglomeráticas. Finalmente, la unidad 5, constituida por lavas de composición andesitas basálticas, perteneciente a los depósitos de Ticomo y Batahola.

Perfiles hidrogeológicos

De acuerdo con la descripción detallada de las características hidrogeológicas correspondientes a las secciones dentro de la Subcuenca II, a continuación, se muestran dichas secuencias representadas en 2D.

Figura 28, se pueden observar las unidades hidrogeológicas correspondientes a la sección A-A' y sección B-B', mostrando un mapa representativo del área de estudio

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

con la identificación y ubicación de las mismas. **Figura 29**, se muestran las unidades hidrogeológicas pertenecientes a la sección C-C' y sección D-D', así mismo, se puede observar la ubicación de estas secciones dentro de la Subcuenca II. Para finalizar, **Figura 30**, presenta las secciones E-E' y F-F', al igual que las anteriores se muestra un mapa representativo del área con la ubicación de cada sección.

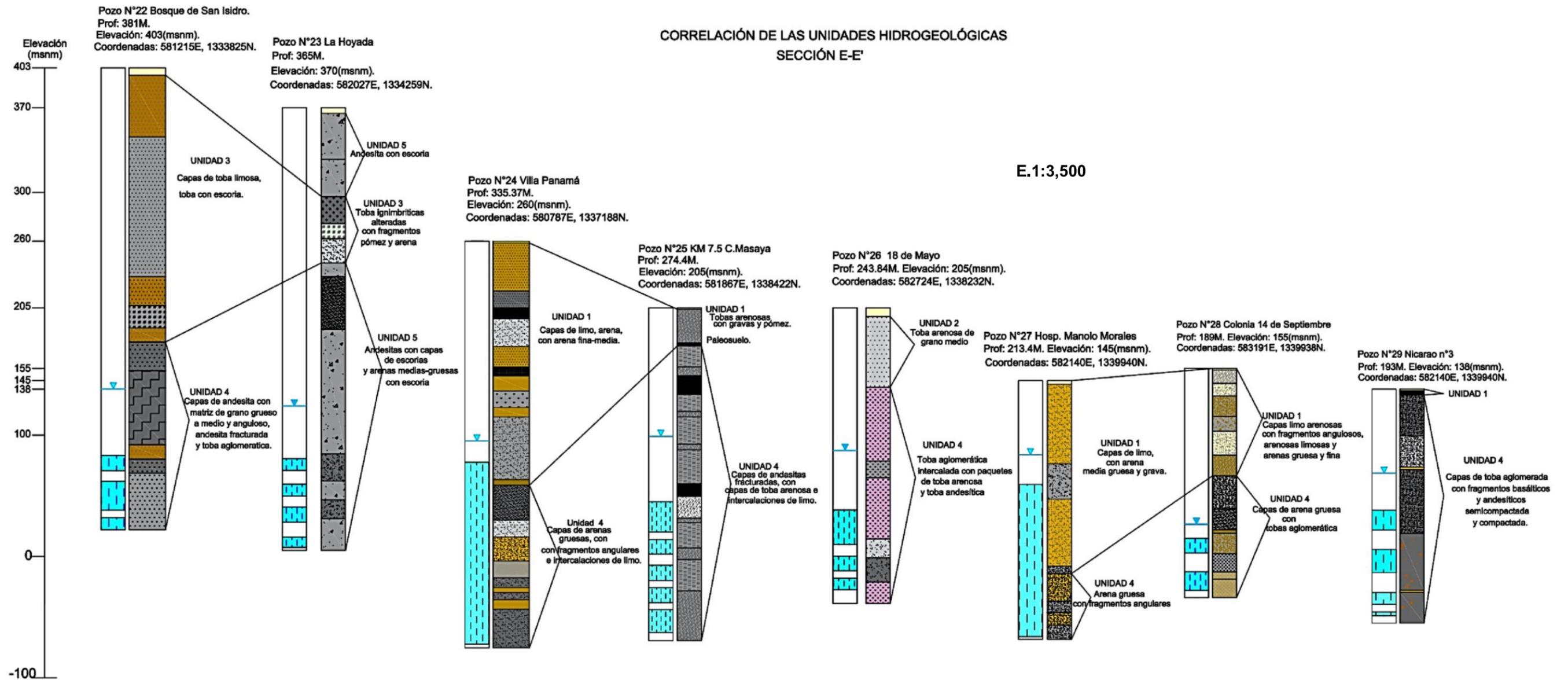
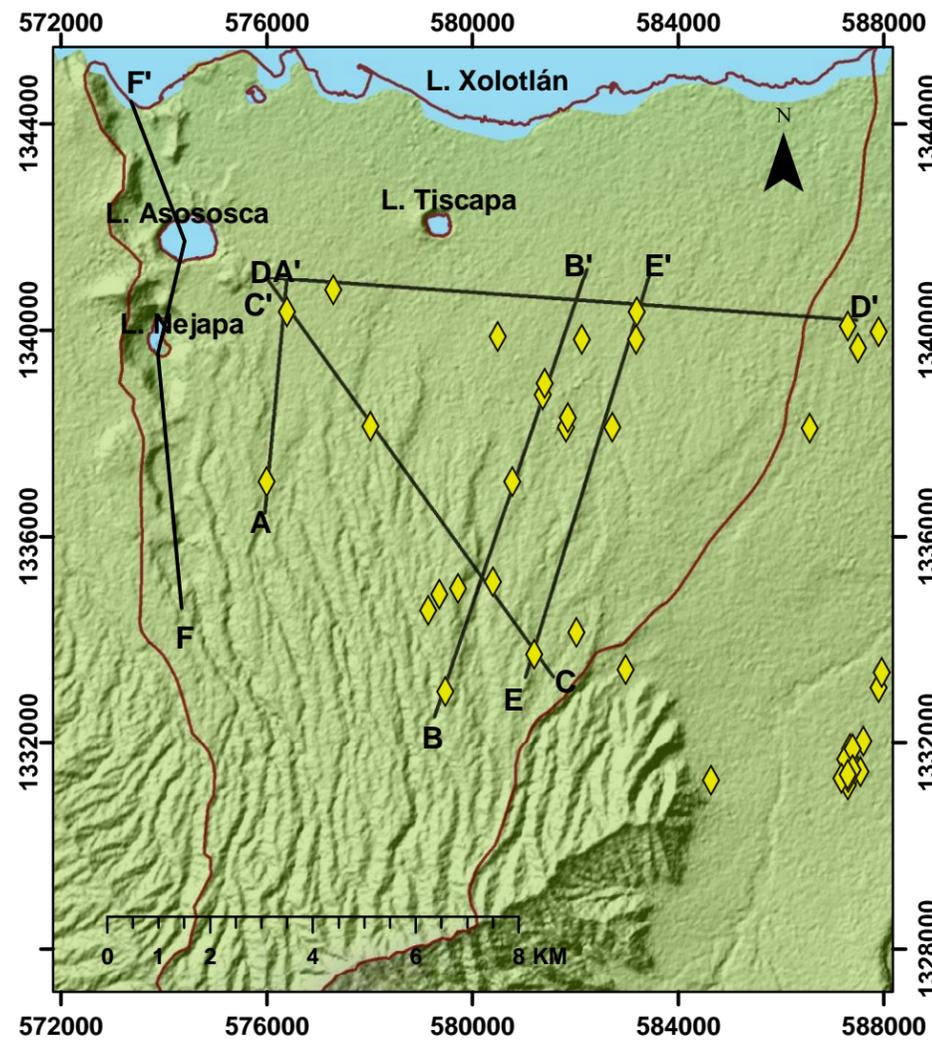


Figura 27. Correlación de litología de pozos – perfil 5.



Simbología

- ◆ Pozos con litología
- Perfiles Hidrogeológicos
- Límite de la Subcuenca II

E.1:140,000

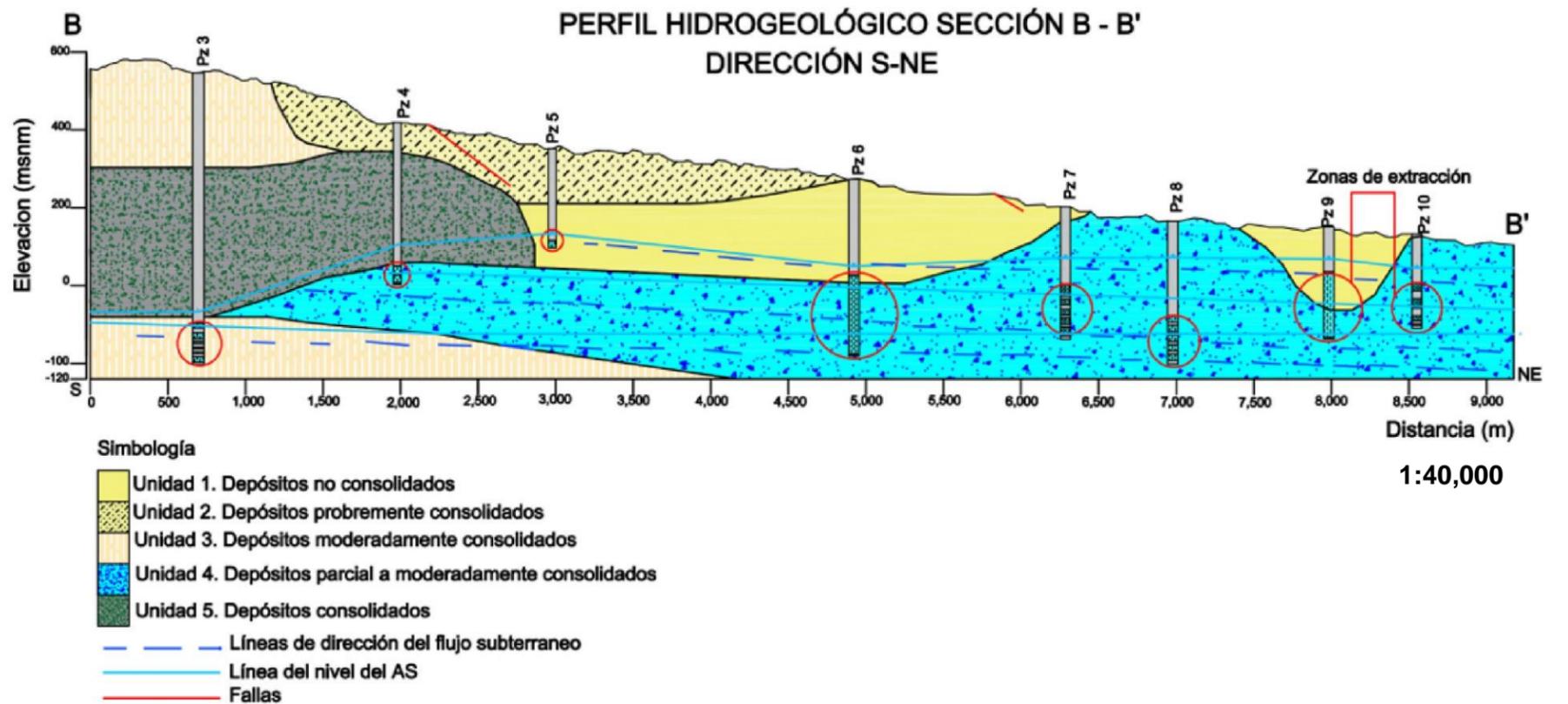
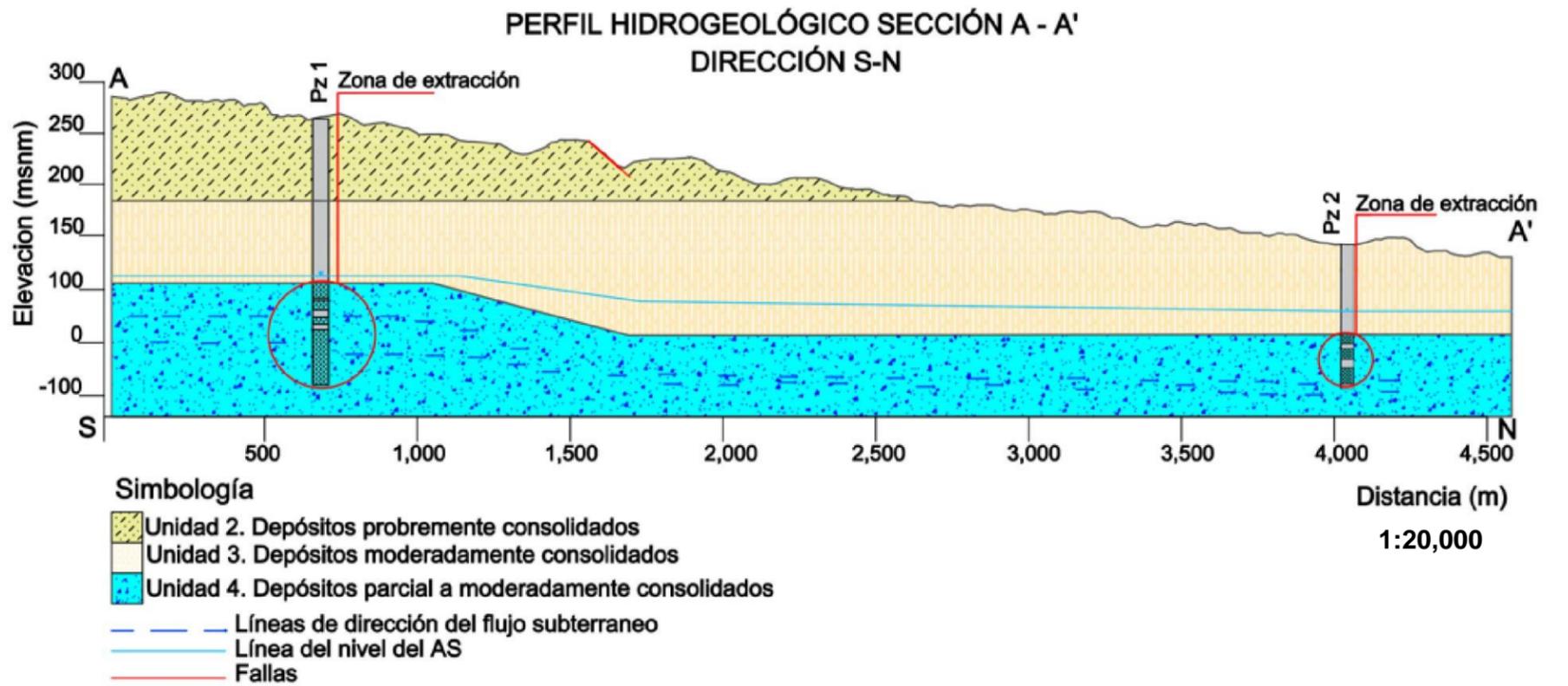


Figura 28. Perfiles hidrogeológicos - Sección A-A' y Sección B-B'.

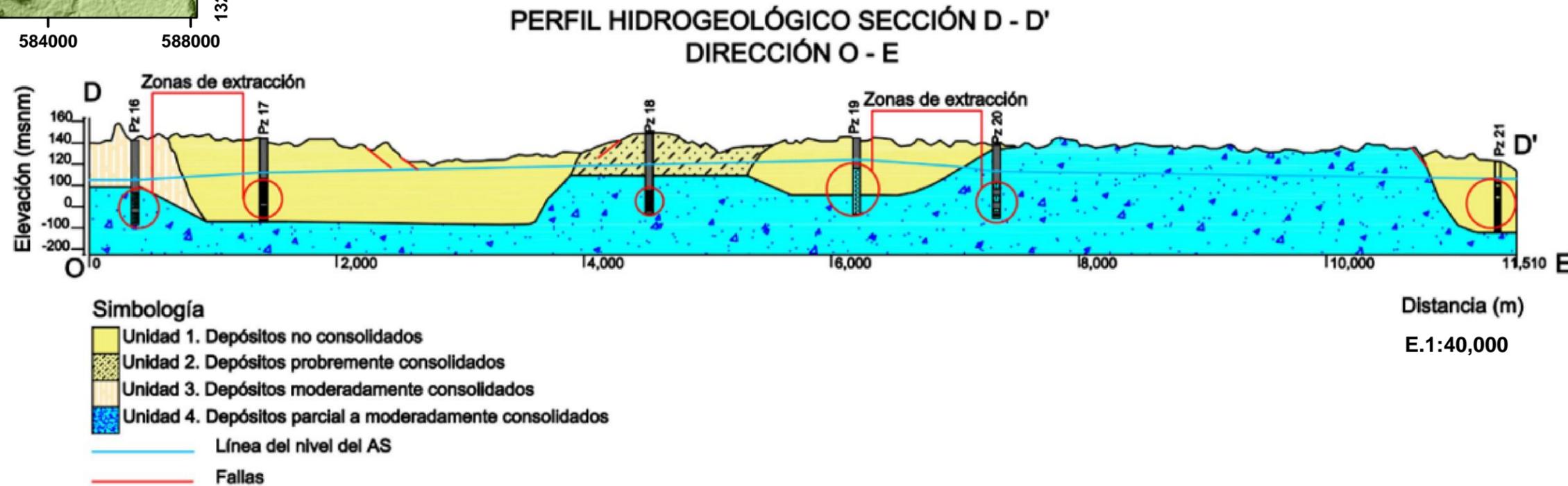
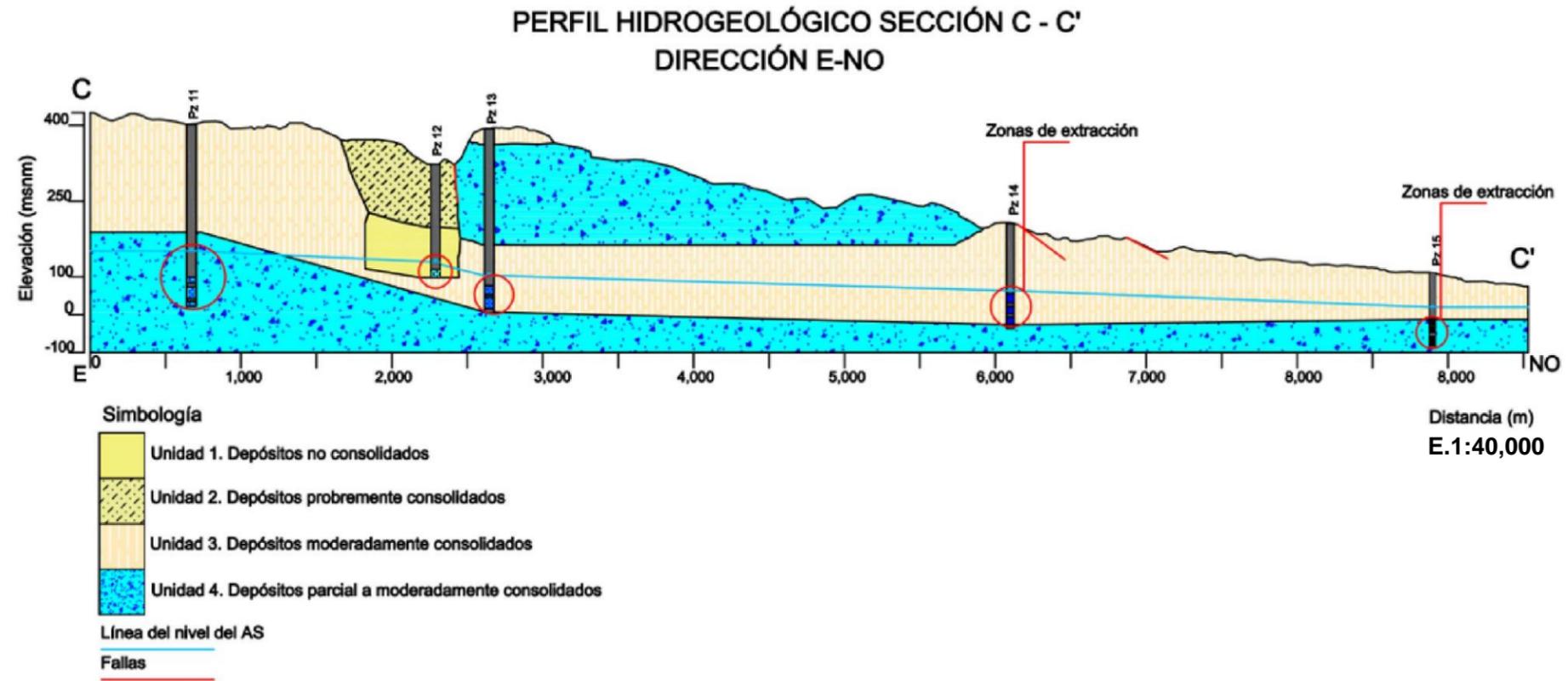
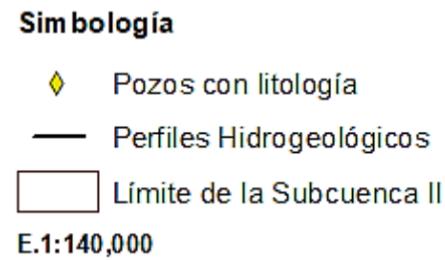
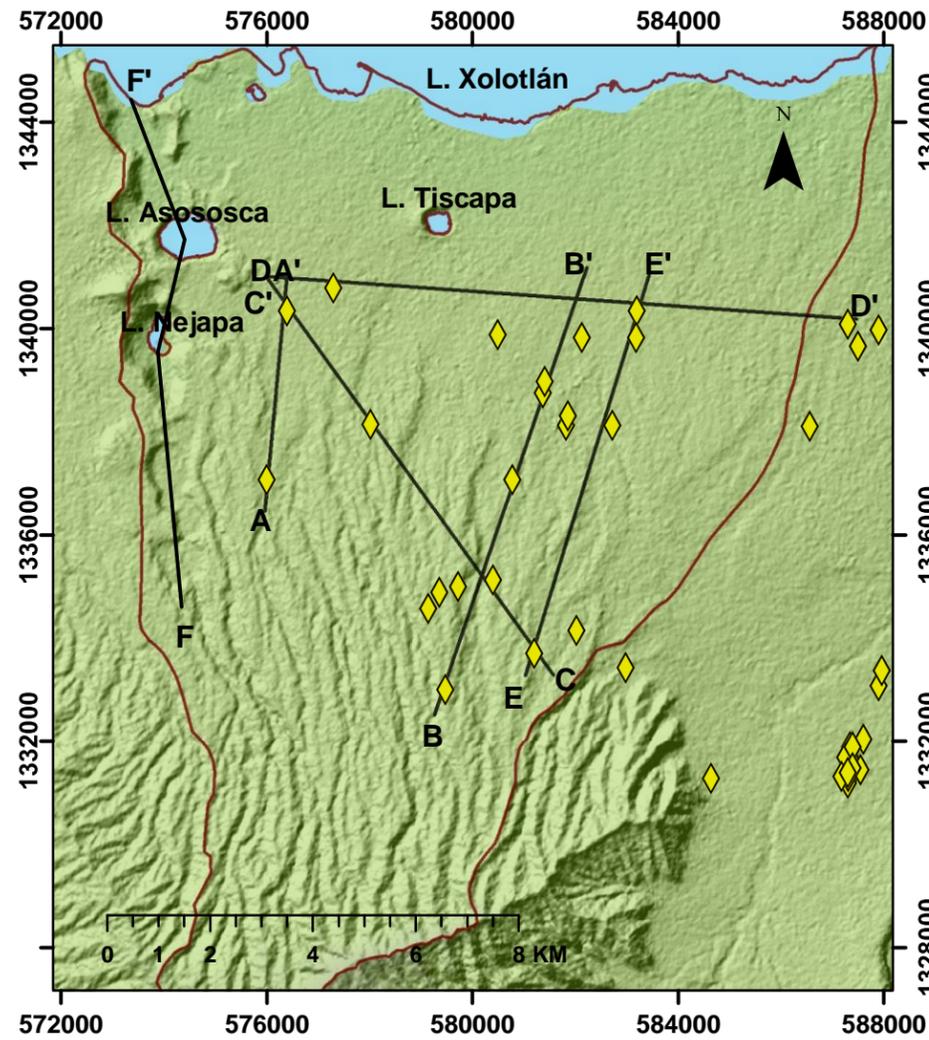
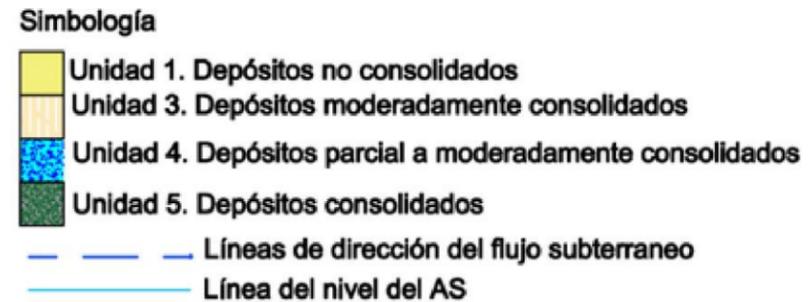
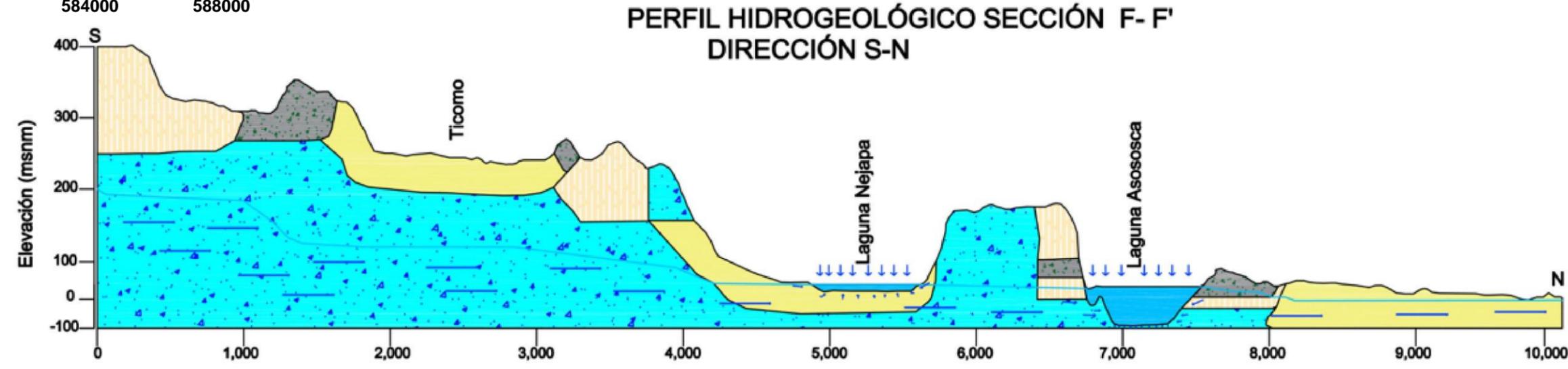
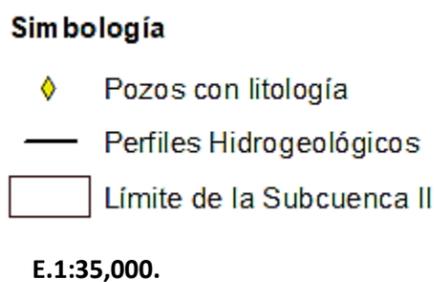
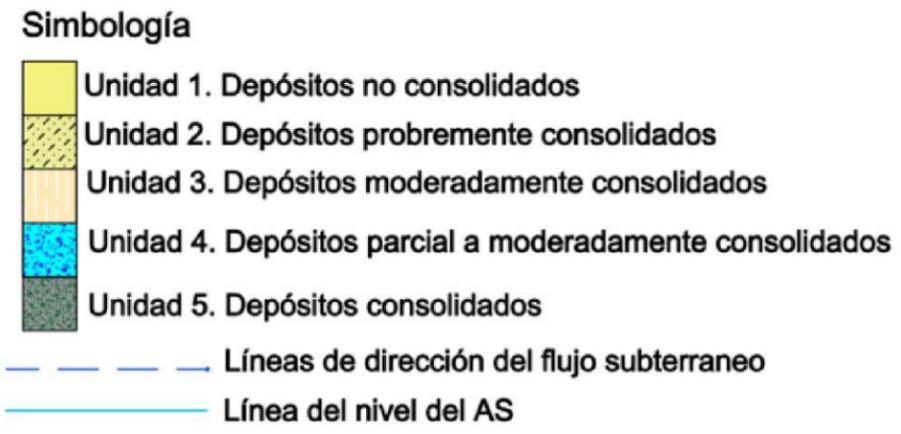
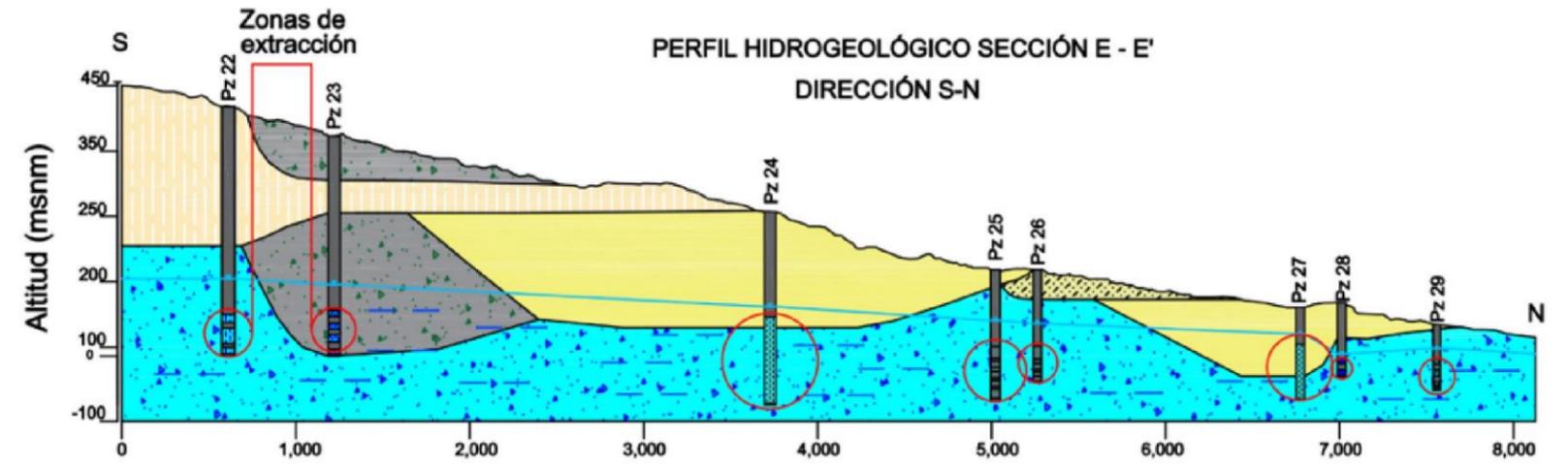
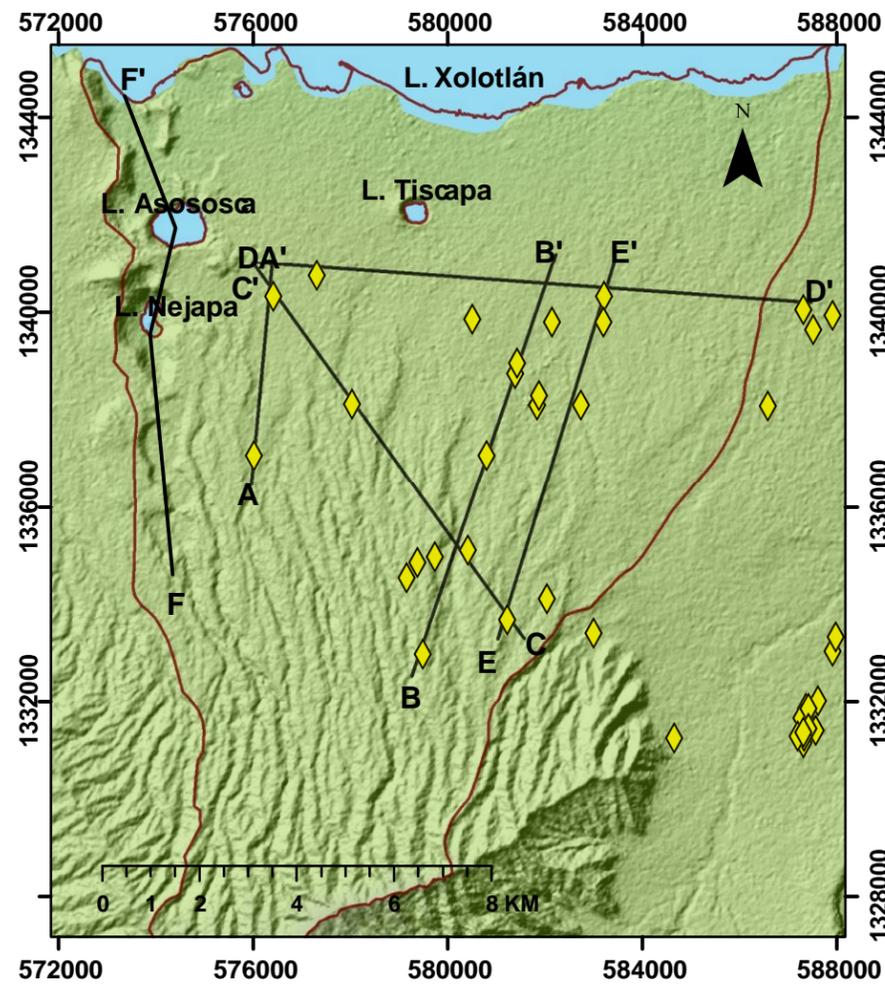


Figura 29. Perfiles hidrogeológicos - Sección C-C' y Sección D-D'.



Distancia (m)
E.1:40,000

Figura 30. Perfiles hidrogeológicos-Sección E-E' y Sección F-F'

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Correlación de las unidades hidrogeológicas (UHG) y formaciones geológicas según sus características litológicas.

A continuación, En la Tabla 14 y 15, se muestra una correlación de acuerdo a la litología encontradas en la clasificación de las unidades hidrogeológicas de la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua y las formaciones geológicas mencionadas por JICA & INAA, (1993), para la sub-área Central de Managua.

Tabla 15. Correlación de las UHG y las formaciones geológicas

| Correlación de las unidades hidrogeológicas y formaciones geológicas | | |
|---|--|--|
| | Unidades hidrogeológicas (UHG) | Formaciones geológicas Según JICA-INAA, (1993). |
| Unidad 1. Depósitos no consolidados | Formado principalmente por depósitos lacustres. Estos están compuestos por limos, arenas limosas, arenas finas a medias, suelos fósiles, arena media a gruesa semicompactada, arenas con fragmentos de escoria y pómez. | Qal. Aluvial Materiales sedimentarios lacustres y aluviales. Con Materiales piroclásticos Cuaternarios provenientes del grupo Masaya. |
| Unidad 2. Depósitos pobremente consolidados | Constituidos por piroclastos de caída, suelos fósiles, cenizas, tobas arenosas semicompactadas, arenas gruesas a media semicompactadas, escoria y arena intercalada. | Materiales Piroclásticos pertenecientes al Grupo Masaya. |
| Unidad 3. Depósitos moderadamente consolidados | Formados por combinación de depósitos piroclastos de caída y de flujos. Compuestos por tobas meteorizadas como tobas limosas con escoria, tobas limosas andesitas, tobas arenosas gruesas con limolita e intercalaciones de paleosuelos. Así mismo, presenta tobas compactadas e ignimbritas con fragmentos angulares. | Grupo volcánico Masaya y Grupo Las Sierras Medio TQps (M), Compuesto por depósitos de flujo piroclásticos y piroclásticos caídos, permeables. |

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Tabla 16. Correlación de las UHG y las formaciones geológicas.

| Correlación de las unidades hidrogeológicas y formaciones geológicas | | |
|--|--|---|
| | Unidades hidrogeológicas (UHG) | Formaciones geológicas Según JICA-INAA, (1993). |
| Unidad 4. Depósitos parcialmente a moderadamente consolidados | Formados por depósitos de flujo piroclástico. Estos depósitos están caracterizados por la presencia de tobas líticas o aglomeráticas semicompactadas a compactadas masivas. | Grupo Las Sierras Medio TQps (M), presentando fracturas y quebradas con suelos fósiles de los aglomerados basálticos-andesíticos compactados de tobas y tobas brechosas |
| Unidad 5. Depósitos consolidados. | Formado principalmente por depósitos de lava. Compuesta por depósitos de composición basáltica a andesítica, con capas de escoria basáltica, tobas andesitas compactadas y en algunos casos con intercalación de andesitas fracturada. | Grupo volcánico Masaya compuesto por flujos de lava basálticos – andesíticos porosos autobrechados, depósitos de flujo piroclásticos y piroclásticos caídos. |

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

4.1.3. Flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua.

De acuerdo con Tóth, (2000), diferentes flujos de agua subterránea pueden ocupar una misma unidad acuífera, o por el contrario que un mismo sistema de flujo puede circular por dos o más unidades acuíferas. Por otro lado, el conocimiento de distribución del flujo subterráneo permite establecer prácticas de manejo que se complementen con el funcionamiento hidrogeológico, de manera que las superficies freáticas, no incidan con las salinidades y alcalinidad del suelo, así mismo, la determinación de estos flujos actúa de manera preventiva en el uso de suelos y ordenamiento territorial.

Los flujos subterráneos, según sus definiciones, pueden ser de tres tipos: local, intermedio y regional, cada uno representa una zona de recarga, tránsito y descarga particular. Así mismo, estos son definidos por la distancia y profundidad de recorrido y su composición química (Alconada., et al., 2011).

Por lo anterior expuesto, en este trabajo para el área de la subcuenca II, Cuenca Sur de Managua, se definen las zonas de flujo local, intermedio y regional. Reconociendo estos tipos de flujo en base a los datos de nivel de agua subterránea registrada en el inventario de pozos para la ciudad de Managua (Tabla 21, ver en anexo) y en complementación de una base de datos recopilada de aproximadamente 90 pozos ubicados dentro del área de estudio, los cuales cuentan solamente con información de profundidad y nivel de agua subterránea.

No obstante, se toma en cuenta la metodología teórica propuesta por Tóth (2000), la cual describe que los parámetros que rigen el funcionamiento del agua subterránea bajo el efecto gravitacional son: Clima, topografía y referente geológico (Alconada., et al., 2011). Sustentando los resultados obtenidos mediante la aplicación del método electromagnético de prospección geofísica para agua subterránea.

Puntualmente, la información de niveles de agua subterránea recopilada representa un 80% de la Subcuenca II, ocupando la parte media alta, media y baja de la misma. Por lo cual, el mapa generado de niveles de agua subterránea no se muestra

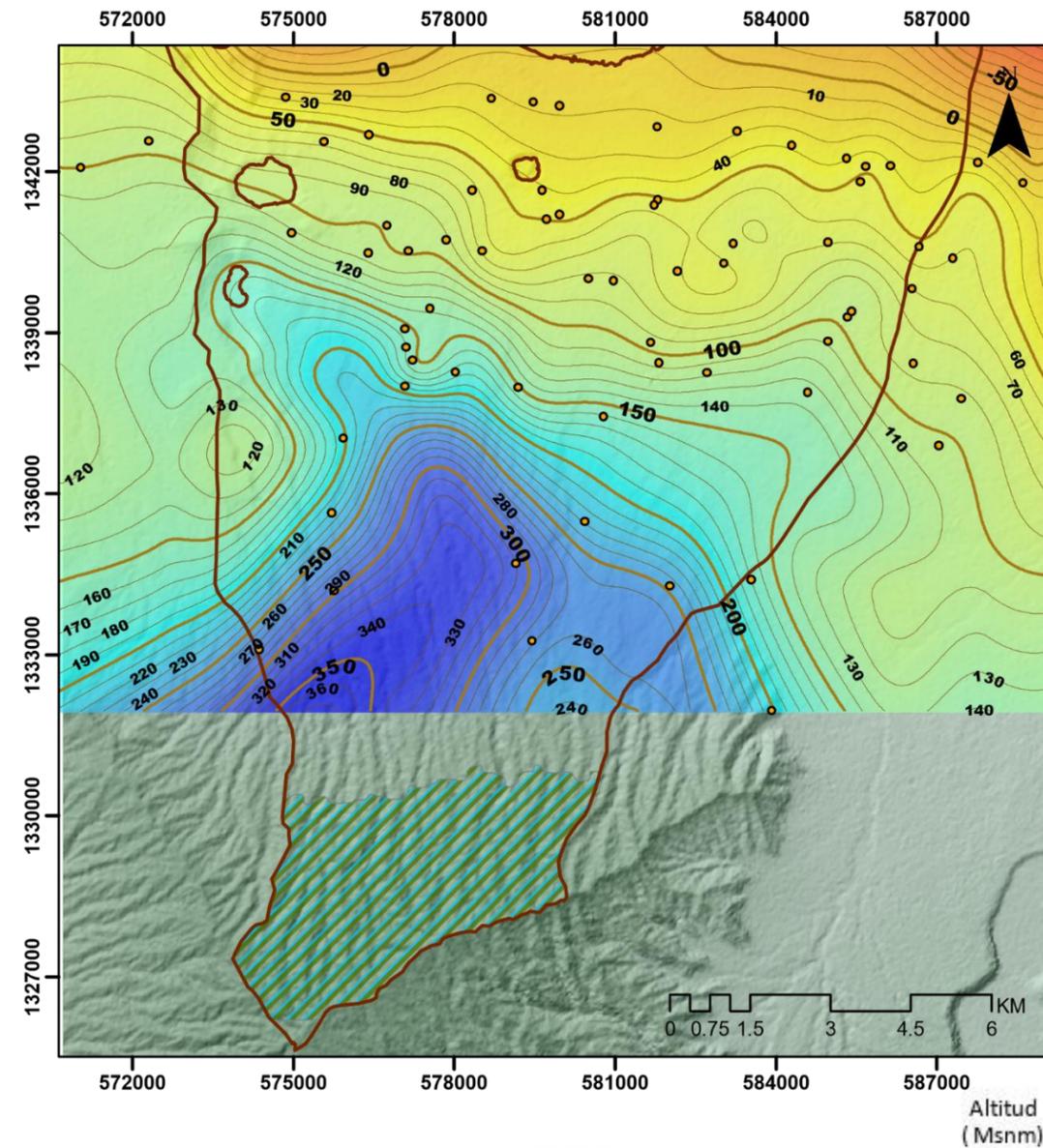
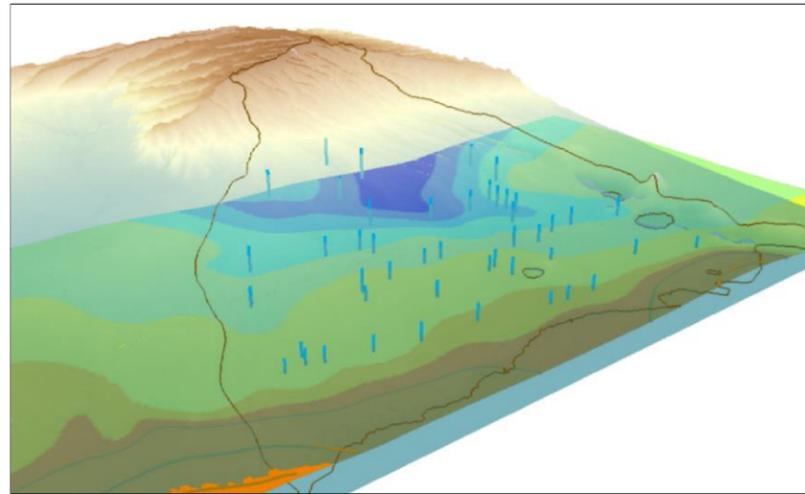
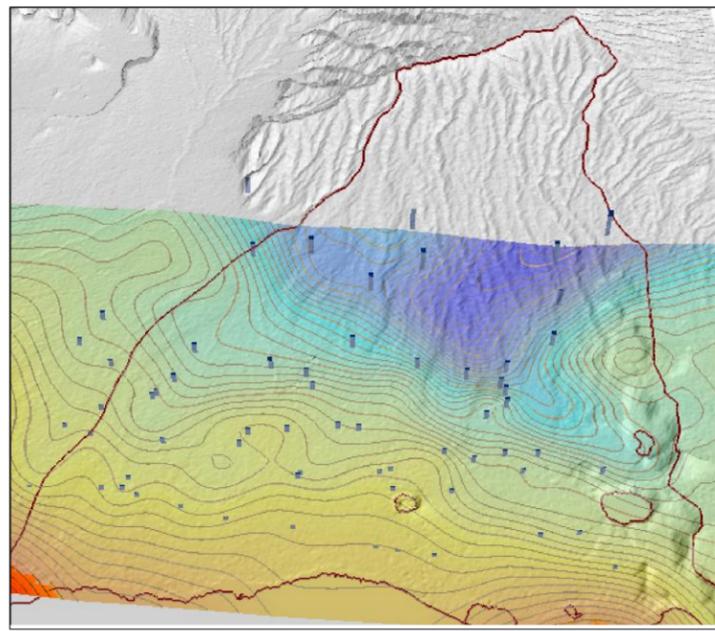
Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

completo, debido a no poseer más datos que cubran en su totalidad el área. En la Figura 31, se presenta el mapa de profundidad de flujo subterráneo para el área de estudio.

Martínez y Cheves, (2017), lograron reconocer la zona de descarga para el área Oeste del acuífero Las Sierras, siendo está la conformada por la parte alta de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua.

Por lo tanto, el flujo regional, según los valores de profundidad del nivel de agua subterránea y de acuerdo a su incidencia zonal, son los valores que se representan como mayores a 285 msnm (ver Figura 31). Mientras tanto, los valores que van de 96 a 212 msnm son los indicadores de un flujo intermedio reconocido como la zona de tránsito. Finalmente, los valores más someros presentes entre 0 – 96 msnm, representan los flujos locales, reconociendo así las zonas de descarga hacia el Lago de Managua.

De manera general, de acuerdo con JICA & INAA, (1993), el flujo subterráneo fluye por materiales provenientes del grupo Las Sierras Medio y Grupo Masaya, así como, a lo largo de las zonas de fracturas localizadas dentro de la Subcuenca II. Por otra parte, según Krasný & Hecht, (1998), mencionan que las aguas subterráneas de la subcuenca son de tipo Bicarbonatadas Sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), Bicarbonatadas Cálcidas-Sódicas y/o Bicarbonatadas Sódicas-Cálcidas ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ y/o $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$), y de tipo CL-Na para la Laguna Nejapa (Véase Capítulo II, Sección 2.2.9).





**UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA**
UNAN-MANAGUA

**FACULTAD DE CIENCIAS
E
INGENIERIAS
INGENIERIA GEOLÓGICA**

**"Modelo conceptual de flujo de
agua subterránea
en la Subcuenca II,
Cuenca Sur del Lago de Managua"**

**MAPA DE PROFUNDIDAD
DEL FLUJO
SUBTERRÁNEO E. 1:130,000**

**Elaborado por:
Br. Erika J. Sánchez Alemán.**

Simbología

- Pozos con datos de profundidad de AS

Rango de valores de profundidad de AS

- 0 - 42
- 42 - 96
- 96 - 150
- 150 - 212
- 212 - 285
- 285 - 373

Curva de Valores de Prof. del AS

- Curva de Valores de Prof. del AS
- Zona de recarga

AS - Agua Subterránea

Sistema de Coordenadas UTM
Datum WGS 1984, Zona 16N

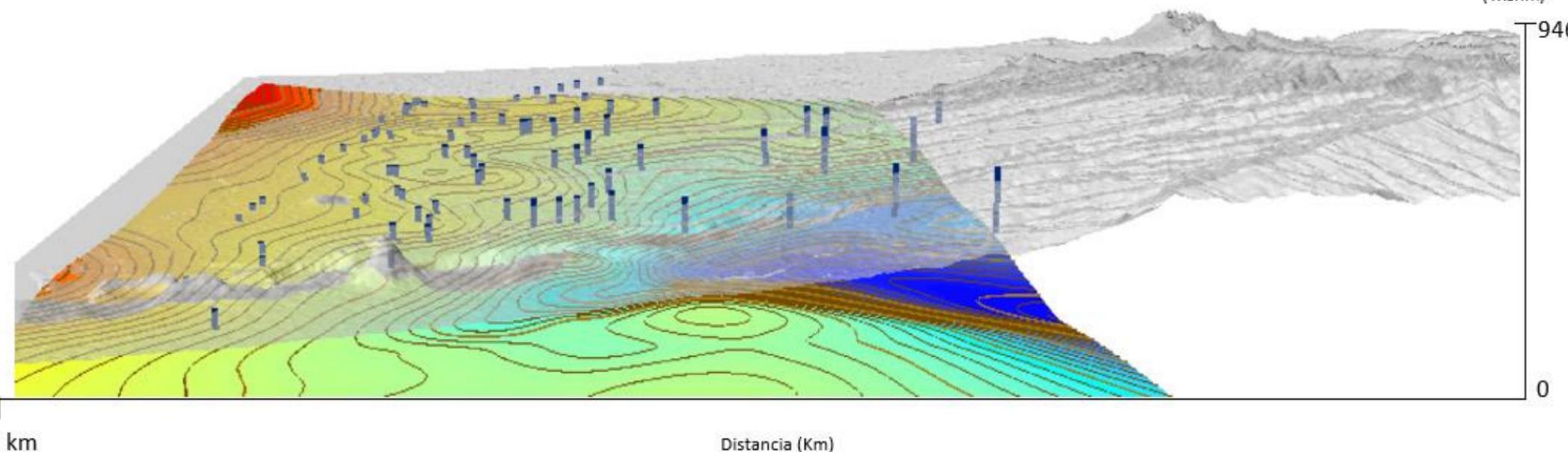


Figura 31. Mapa de profundidad de flujos

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

4.1.4. Descripción de secciones electromagnéticas en la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua.

Para el área de la Subcuenca II, se realizaron 15 secciones electromagnéticas en diferentes puntos dentro de sus límites. Según el registro presentado en la Tabla 7 (**Véase Capítulo III, Sección 3.1.4**), dichos perfiles están orientados con dirección O-E. De manera general, en una sección electromagnética invertida, la línea horizontal representa la longitud sobre el terreno (en metros) y la línea vertical representa la profundidad de investigación alcanzada (en metros). La escala de colores representa los valores electromagnéticos en mili voltios (mV).

Debido a la variabilidad de las características hidrogeológicas del área de estudio, se han encontrado rangos de valores variables en las escalas de potencial eléctrico. Por lo que se ha clasificados los perfiles electromagnéticos según su posición topográfica dentro de la Subcuenca II. Es decir, la secuencia de los levantamientos EM en la parte más baja del área de estudio (cercana al lago de Managua), conforman la sección denominada A-A'EM. Los perfiles de la zona media, ubicados al Sur de Asososca y Tiscapa, conforman la sección B-B'EM. Los perfiles ubicados en la parte media-alta de la subcuenca, conforman la sección C-C'EM. Finalmente, los dos perfiles electromagnéticos ubicados en la parte alta de la subcuenca, se denominan D-D'EM.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de cada perfil EM (electromagnéticos), a partir del procesamiento de los levantamientos en campo (para ver detalles de coordenadas y altitud, consultar Tabla 7). **En la Tabla 17**, se muestran los perfiles pertenecientes a la sección A-A'EM, con dirección Oeste-Este.

Tabla 17. Sección A-A'EM

| PEM | Ubicación | Long(m) |
|------------|------------------------------------|----------------|
| PEM1 | Los Martínez | 85 |
| PEM2 | MITRAB | 215 |
| PEM3 | Bo. Los Pescadores | 185 |
| PEM4 | Bo. Selim Shible (Carretera Norte) | 100 |
| PEM5 | Bo. Selim Shible (Carretera Norte) | 95 |
| PEM6 | Poder Judicial (Carretera Norte) | 200 |

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PEM1. Los Martínez-Las Brisas

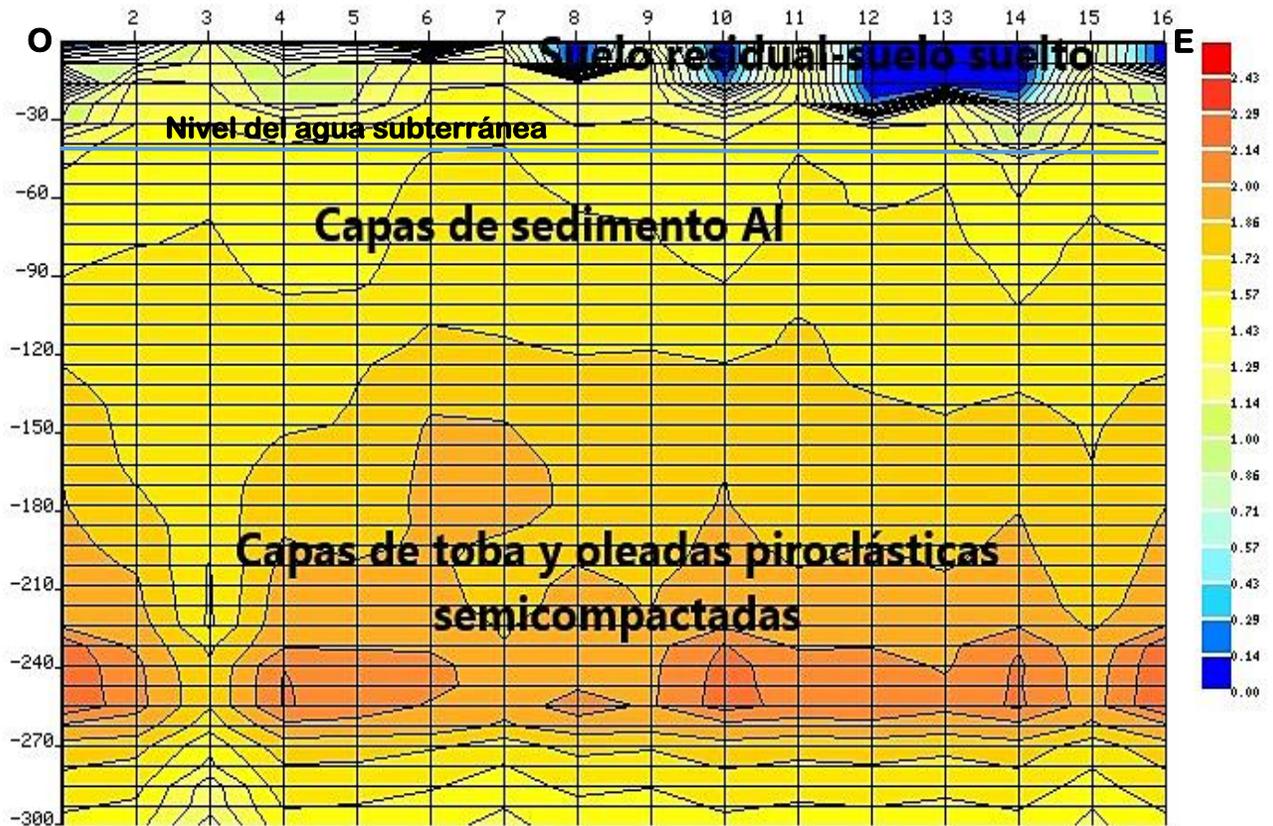


Figura 32. PEM1. Los Martínez.

Figura 32. Los valores de 0.00 a 1.14, representadas por el color azul a verde, en el mapa de procesamiento del levantamiento electromagnético, representa una capa de 5 a 20 metros de espesor aproximados, compuestos por suelo reciente o capa vegetal húmeda. Los rangos equivalentes a 1.29 a 1.72, muestra valores que van desde los 20 m hasta 150 m de profundidad, compuestas por capas de sedimento aluvial, los cuales se encuentran saturados.

Finalmente, de 1.86 a 2.14, en profundidad a partir de los 150 hasta 270 metros se encuentra un espesor que de acuerdo a su posición geológica es considerado como constituidos por tobas y oleadas piroclásticas semicompactadas, posiblemente saturadas, ya que el nivel de agua subterránea se encuentra entre 30 y 40 metros (indicada en la imagen con una línea azul).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PEM2.MITRAB

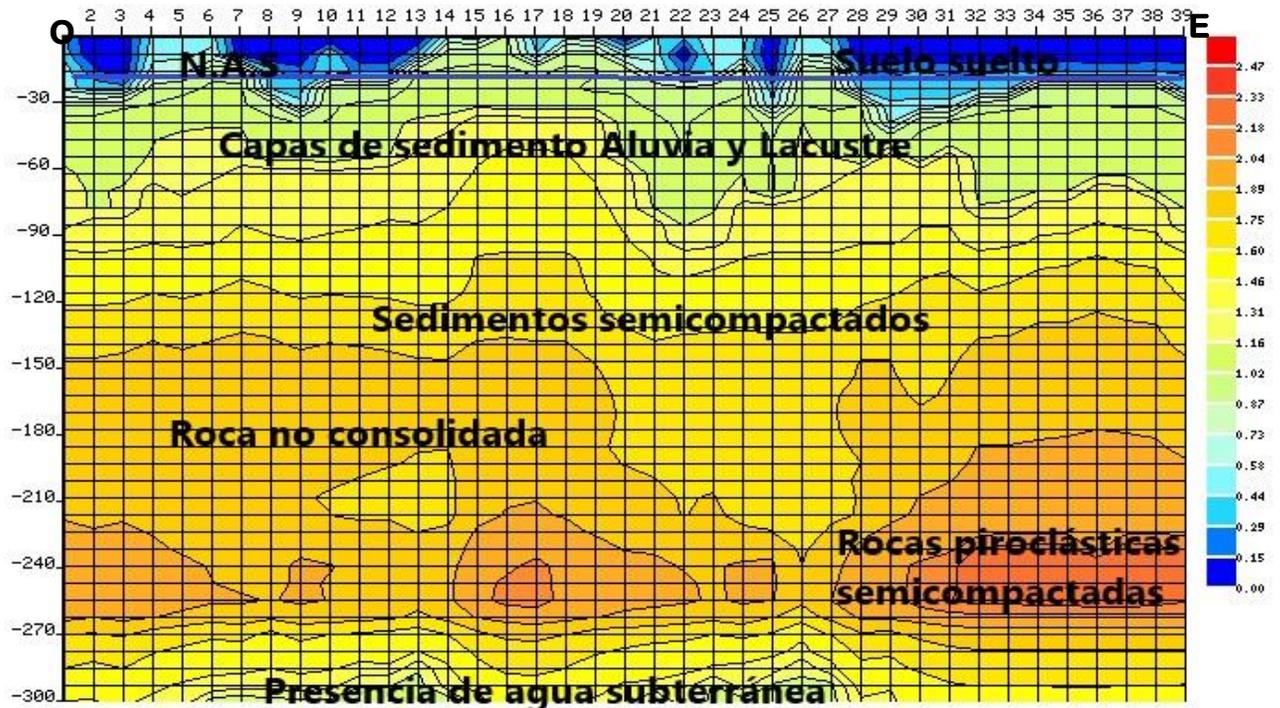


Figura 33. PEM2. MITRAB

Figura 33. Los valores de 0.0-1.16, ubicados en el mapa procesado indica una capa de suelo suelto de aproximadamente 30 m, combinando a partir de los 30 m hasta 120 m de profundidad con sedimentos aluviales y lacustres no consolidados, representados por los valores de 1.02 a 1.60.

Los valores de 1.60 a 1.75, muestra un espesor aparente de 30 metros de sedimentos semicompactados, los cuales varían a partir de los 150 metros de profundidad como se observa desde la estación 19 hasta 28 (medición en superficie). No obstante, en la parte inferior derecha del mapa, a partir de los 245 a 260 m de profundidad se observa una masa rocosa semicompactada, atribuida como material piroclástico. Sin embargo, se puede decir que en este perfil todo el material hasta los 300 metros se encuentra saturado. El Nivel de agua subterránea representado con una línea azul y con iniciales "N.A.S", se encuentra a los 20 metros.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PEM3. Bo. Los Pescadores.

De manera general, este perfil (**Figura 34**), no presenta valores significativos en las rocas, debido a que el agua subterránea en este punto es muy superficial. Presentando valores de 1.41 a 2.22, constituidos por sedimentos lacustres y aluviales no compactados, que van desde los 20 a 100 m de profundidad.

Los valores de 2.63 a 3.03, varían a lo largo de los 185 m del levantamiento, entre sedimentos no compactados a semicompactados, a profundidad de 100-220 m. Finalmente, a partir de los 220 m y hasta el límite del registro a los 300 metros, se encuentra constituido por capas de sedimentos no consolidadas, saturadas.

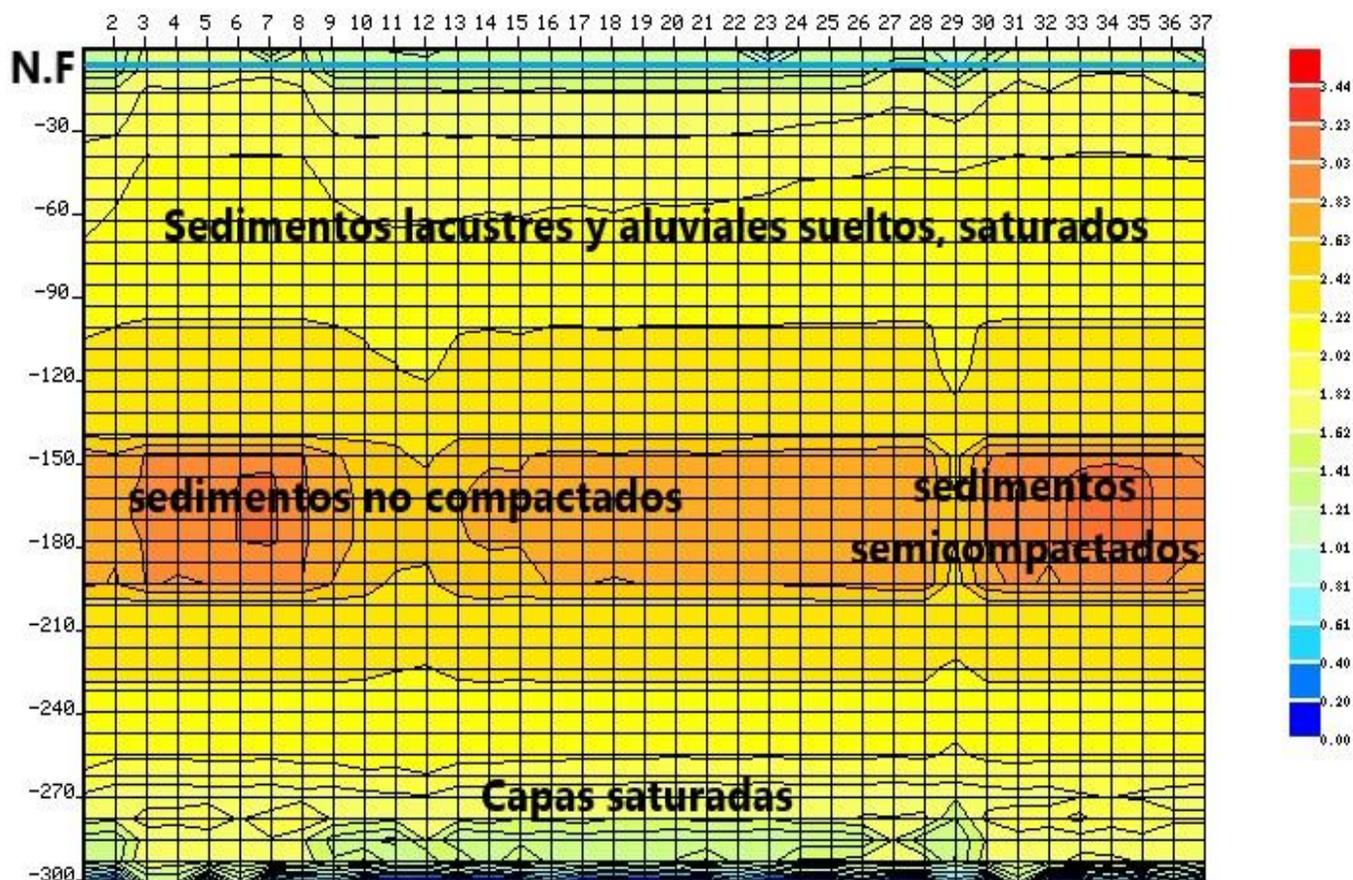


Figura 34. PEM3. Bo. Los Pescadores

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PEM4 y PEM5. Bo. Selim Shible (Carretera Norte).

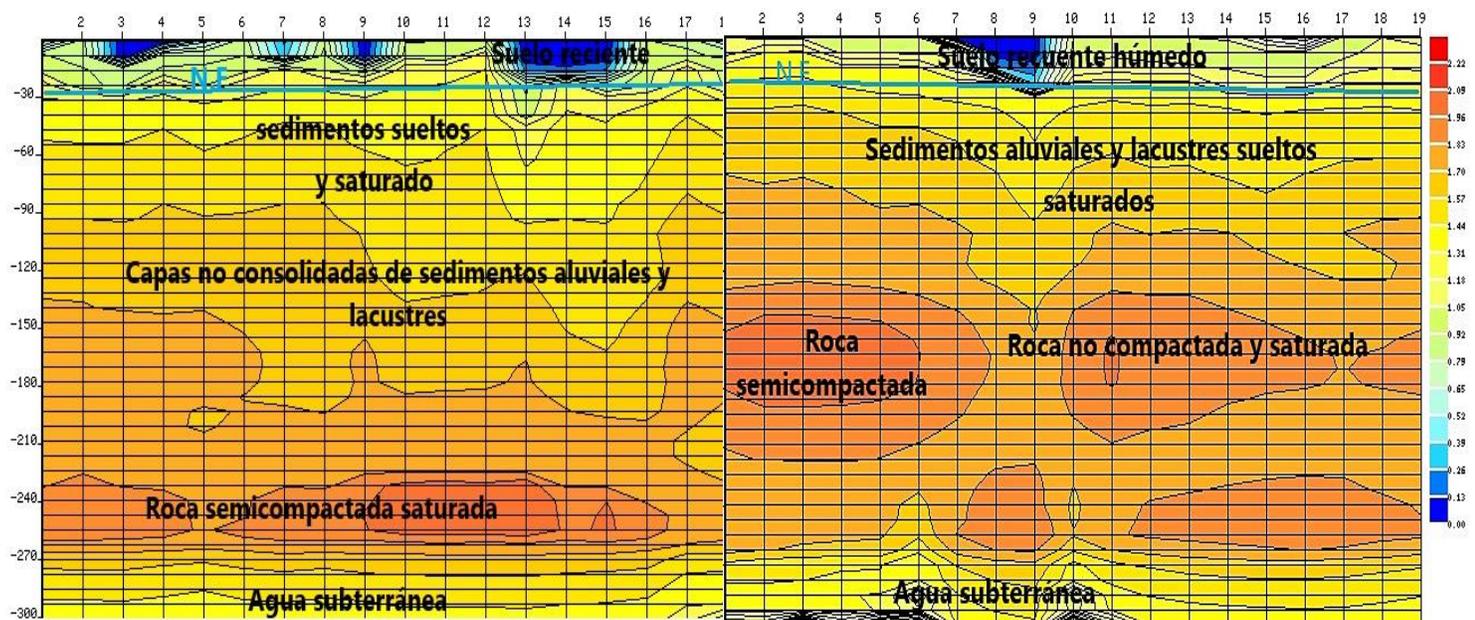


Figura 35. PEM4 Y PEM5. Bo. Selim Shible

En la Figura 35, se muestran los perfiles EM 4 y 5 unidos, ya que se encuentran relativamente cerca. De acuerdo a los valores registrados, estos presentan capas de sedimentos aluviales y lacustres no consolidados y saturados, ya que, el agua en este punto se encuentra entre 15 y 30 metros, así mismo, presentan capas semicompactadas saturadas de sedimentos lacustre y aluvial desde los 240 a 270 m de profundidad, en el PEM4. Mientras en el PEM5 estas capas semicompactadas se presentan a los 150 y 100 m de profundidad, en un rango de valores de 1 a 2.09.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PEM6. Poder Judicial (Carretera Norte)

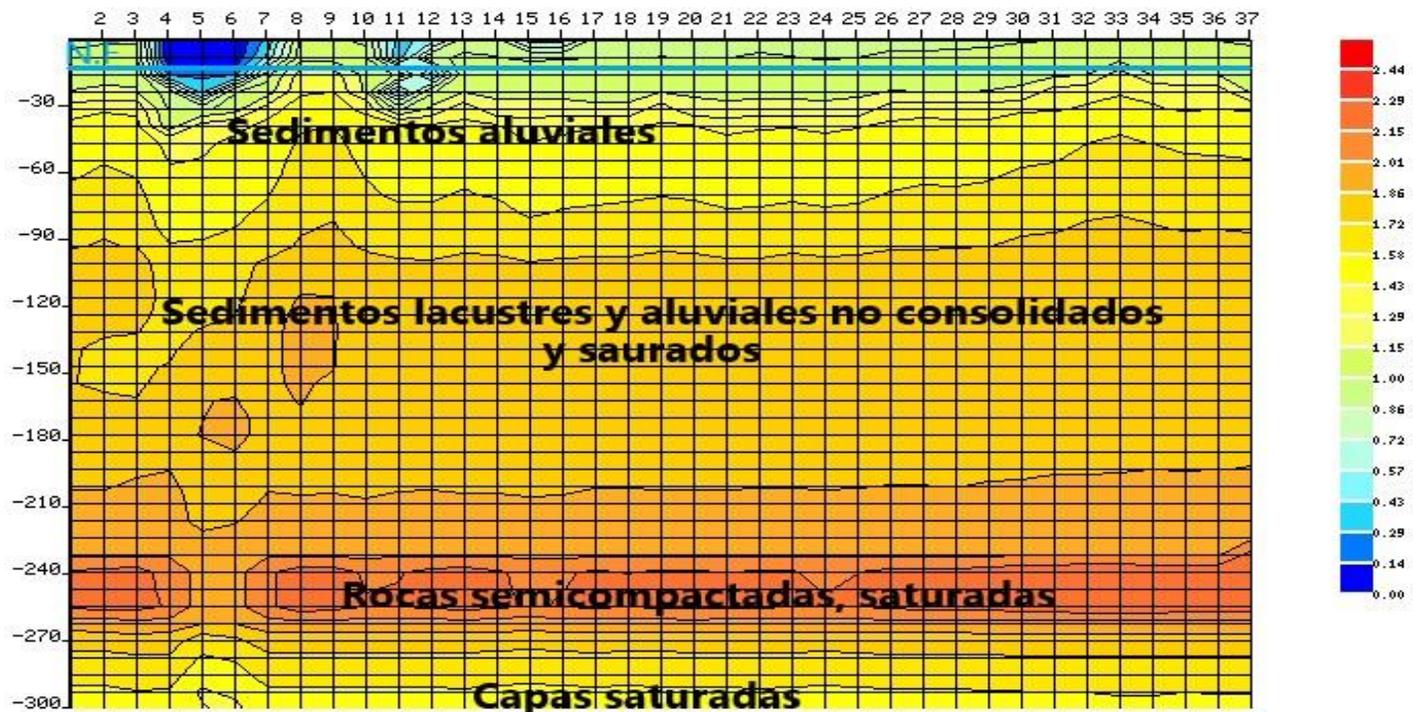


Figura 36. PEM6. Poder Judicial (Carretera Norte)

Figura 36. Los niveles de agua subterránea en este punto se encuentran entre 15 y 20 m. Los valores de 1.15 - 1.58 son representativos de sedimentos aluviales, no compactados y saturados, los cuales se encuentran a partir de los 30 m a 90 m de profundidad. Los valores de 1.72 - 2.01, representan un paquete de sedimentos lacustres y saturados poco compactados, abarcando los 200 m de longitud del perfil, a partir de los 90 m hasta los 210 m de profundidad. Finalmente, los valores de 2.01 - 2.15, en esta área representa rocas semicompactadas, atribuida a depósitos piroclásticos retrabajados.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

En la **Tabla 18**, se muestran los perfiles pertenecientes a la sección B-B'EM. Todos ellos con dirección Oeste-Este.

Tabla 18. Sección B-B'EM

| PEM | Ubicación | Long. (m) |
|-------|-----------------------------------|-----------|
| PEM7 | Colonia Molina | 110 |
| PEM8 | Colegio República Villa Venezuela | 155 |
| PEM9 | Polideportivo España | 100 |
| PEM10 | Rotonda El periodista | 110 |

PEM7. Colonia Molina

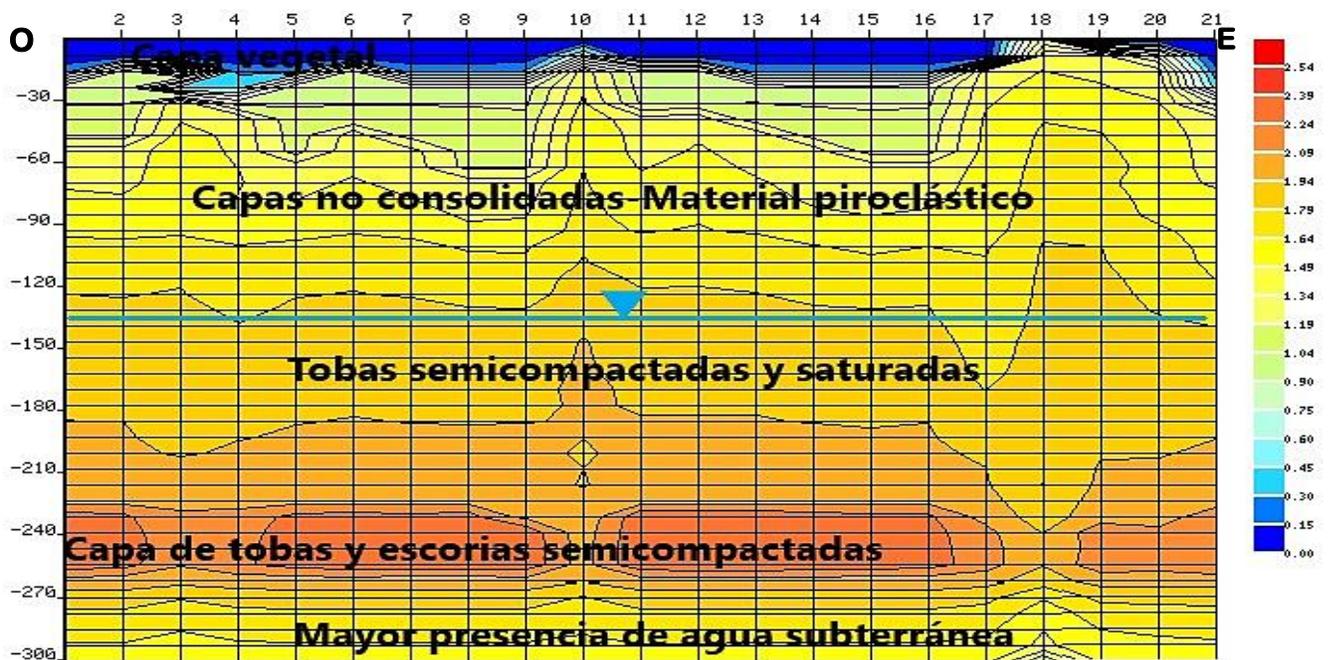


Figura 37. PEM7. Colonia Molina.

Figura 37. Los valores de 0.00 a 1.19, encontrados en el mapa de proceso para este punto, representan a una capa vegetal o suelo suelto de aproximadamente 60 m de espesor. Los valores de 1.34 a 1.64, muestran la presencia de materiales piroclásticos poco compactados, que se encuentran a partir de los 60 m hasta 130 m de profundidad. Por otro lado, los valores de 1.79 a 1.94, forman una capa de piroclastos semicompactados, saturados, encontrado entre 130 a 200 m de profundidad. Los rangos de 2.09 y 2.24, son los pertenecientes a una capa de toba semicompactada, la cual se encuentra entre los 200 m y 280 m de profundidad,

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

alcanzando a partir de esta última profundidad materiales piroclásticos no consolidados y saturados. El nivel de agua subterránea se encuentra a 140 m de profundidad.

PEM8. Colegio República Villa Venezuela.

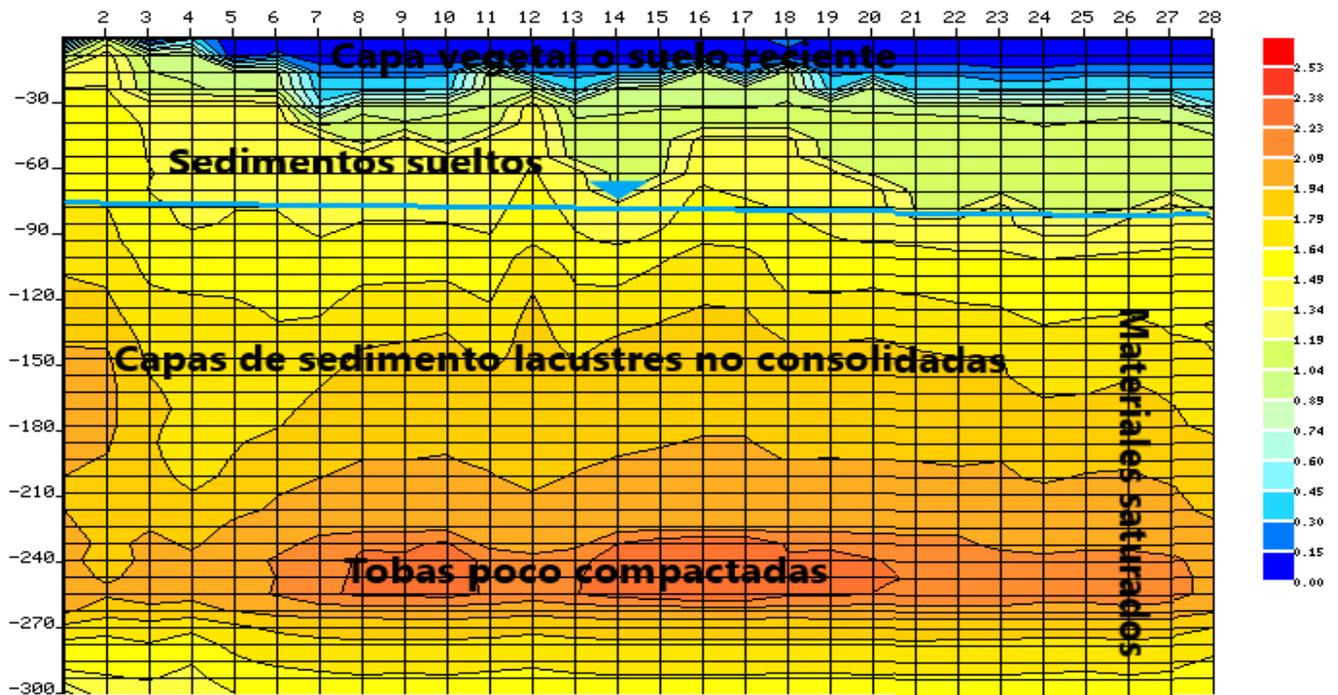


Figura 38. PEM8. Colegio República Villa Venezuela.

Figura 38. Los valores de 0.00 - 0.74, representan una capa vegetal la cual alcanza una profundidad de 30 m, la cual se encuentra sobre depósitos de sedimentos sueltos de aproximadamente 90 m de espesor. Los valores de 1.94 a 2.09, muestran presencia de sedimentos lacustres saturados, no consolidados que llegan a los 210 m de profundidad. Finalmente, entre 210-270 m de profundidad se encuentra una capa de tobas semicompactadas, la cual consta de valores de 2.23 a 2.38.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PEM9. Polideportivo España.



Figura 39. PME9. Polideportivo España

Figura 39. El agua subterránea en este punto se encuentra a 70 metros. Las capas de sedimentos superficial suelto y con cierto contenido de humedad van a los 60 metros de profundidad. Los valores de 1.80 a 2.06, representan a una capa de sedimento semicompactada de aproximadamente 90 m de espesor. En su base entre los 270 a 300 metros presenta rocas fracturadas saturadas en agua.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PEM10. Rotonda El Periodista

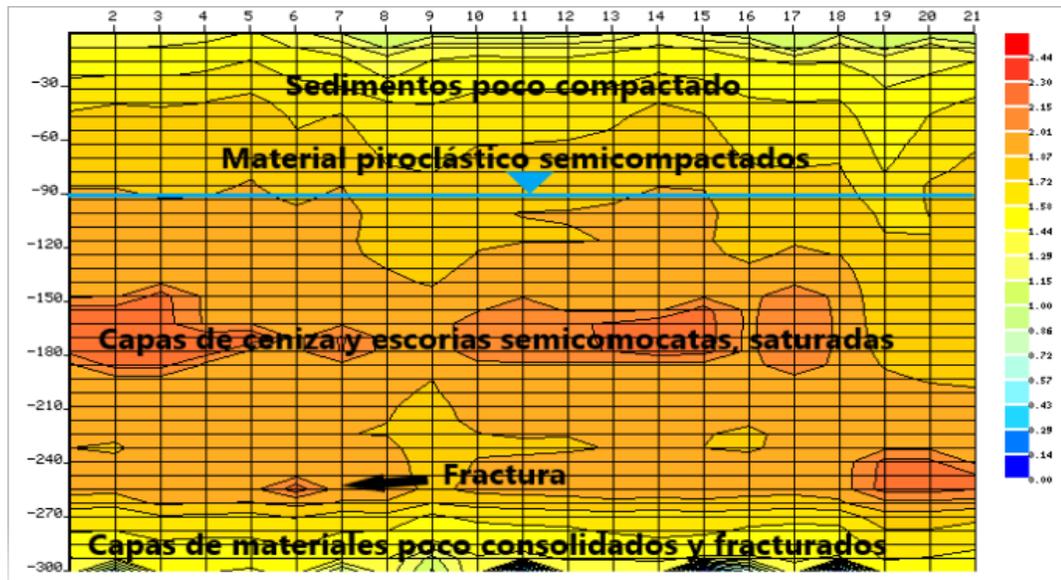


Figura 40. PEM10. Rotonda El Periodista

Figura 40. Los valores de 1 a 1.72, representan sedimentos de origen piroclástico no compactados, con aproximadamente 60 m de espesor. El nivel del agua subterránea se presenta a 90 metros de profundidad. Los valores de 1.87 a 2.01, muestran materiales piroclásticos poco compactados, mientras los valores de 2.15 a 2.30, representan capas de ceniza y escoria semicompactadas y saturadas, estos materiales presentan cierto grado de fracturamiento. Puntualmente, en la estación 6 a los 255 m de profundidad se observa una pequeña fractura, así como, a los 300 metros de profundidad, en la base, se observan rocas fracturadas las cuales no se logran apreciar debido a la limitación del alcance vertical del levantamiento. No obstante, se puede inferir que estos son materiales fracturados de acuerdo a su posición geoestructural, en la cual infiere la falla Tiscapa.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

En la **Tabla 19**, se muestran los perfiles pertenecientes a la sección C-C'EM, tomados en direcciones variadas.

Tabla 19. Sección C-C'EM

| PEM | Ubicación | Long (m) |
|-------|---------------------------|----------|
| PEM11 | Bo. Camilo Ortega | 80 |
| PEM12 | Villa Foresta Sur-Managua | 100 |
| PEM15 | Lomas de Santo Domingo | 100 |

PEM11. Bo. Camilo Ortega

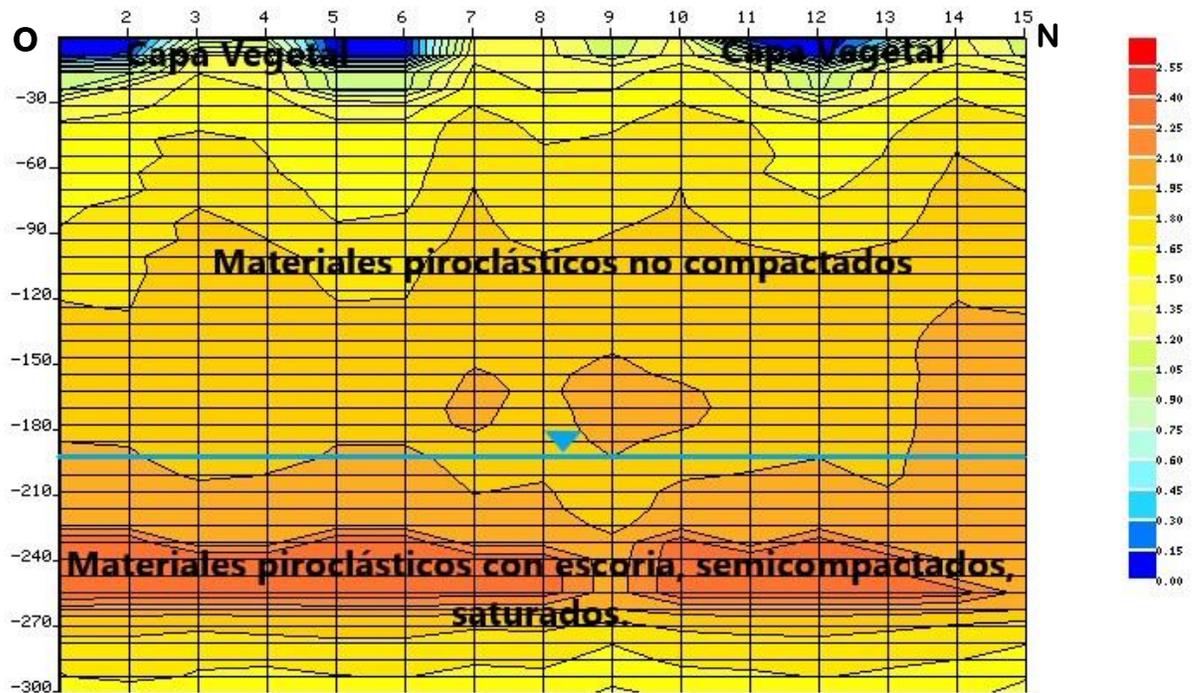


Figura 41. PEM11. Bo. Camilo Ortega.

Figura 41. Se muestran valores de potencial correspondiente a materiales piroclásticos. De 0.15 a 1.20, representa una capa vegetal o de suelo reciente de 30 m aproximados de espesor. Los valores de 1.35 a 1.95, que van desde los 30 hasta 180 de profundidad, conforma una capa de material piroclástico no compactado. Los rangos de 2.10 a 2.40, corresponden a las características de ceniza y escorias semicompactadas, la cual se encuentra desde los 210 m de profundidad hasta 260 m, No obstante, estos materiales se encuentran saturados. El agua subterránea se encuentra a los 140 m de profundidad.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PEM12. Villa Foresta Sur

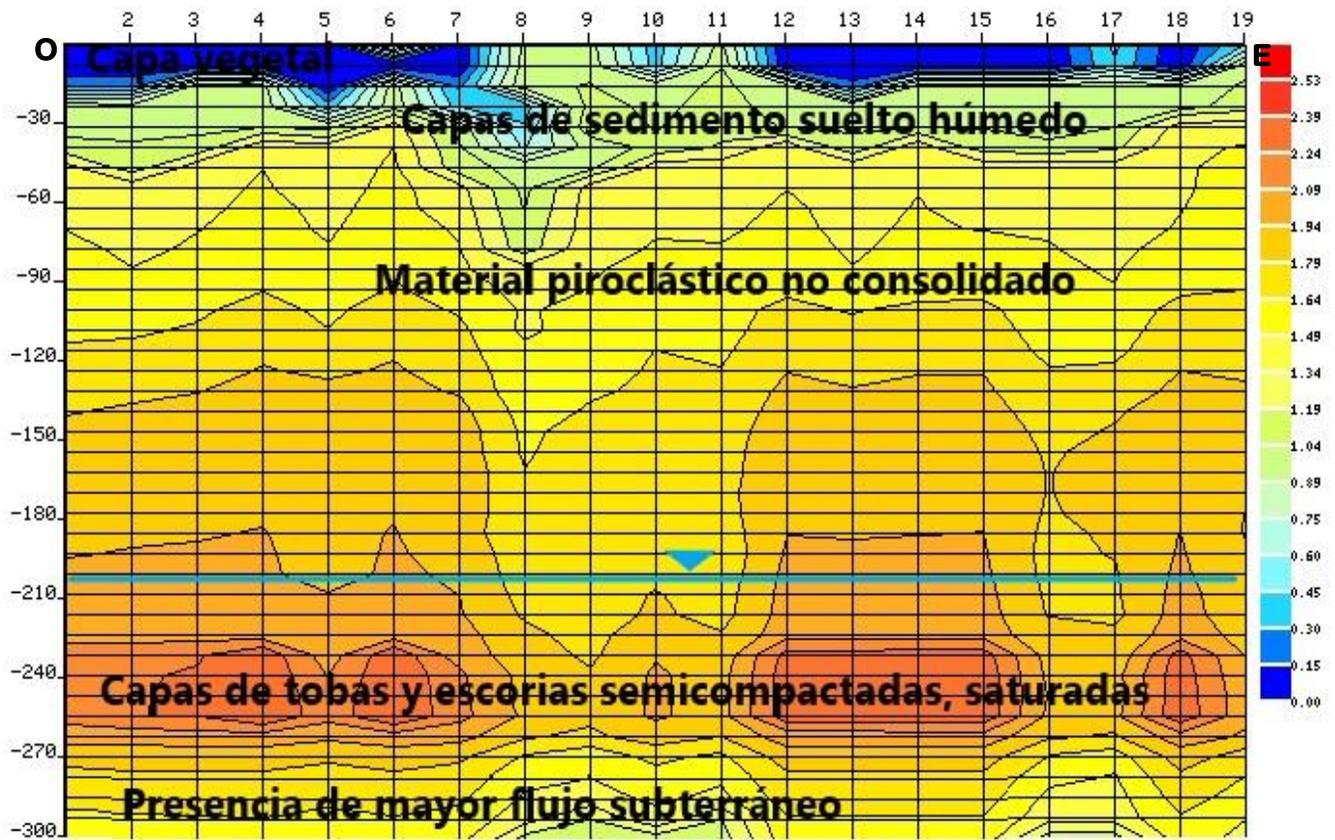


Figura 42. PEM12. Villa Foresta Sur.

Figura 42. Los valores de 0.00 a 0.75, representan a una capa vegetal de aproximadamente 30 m de espesor, en el mapa de contorno. De acuerdo a la secuencia que muestra el levantamiento EM, los valores de 0.89 a 1.19, representan una capa de sedimento suelto, con cierto grado de humedad, de 20 m de espesor aproximado. No obstante, el rango de 1.34 a 2.09, es conformada por materiales piroclásticos no consolidados. Finalmente, los rangos mayores se pueden observar a partir de los 2.24 a 2.39, compuesta por capas de tobas y escorias semicompactadas, las cuales se encuentran saturadas, debido a que el nivel del agua subterránea en este punto alcanza los 200 metros de profundidad.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

PM15. Lomas de Santo Domingo

Figura 43. El PEM, muestra valores de 0.00-0.66, pertenecientes a una capa de suelo vegetal, muy superficial, su mayor espesor se encuentra en las estaciones 8 y 9, con aproximadamente 15 m. Los rangos de 0.79 a 1.05, conforman las características de una capa de sedimento suelto muy superficial, con cierto contenido de humedad. No obstante, se presentan los valores de 1.19 a 1.71, los cuales muestran un espesor de sedimentos piroclásticos no consolidados que abarcan hasta los 100 metros en el costado Sur del perfil, mientras hacia al Norte, se vuelve más constante hasta los 240 y 300 m de profundidad.

Entre los 240 y 300 m de profundidad en la parte Oeste se puede ver una roca de toba semicompactada, la cual se encuentra saturada, ya que, el agua subterránea en este punto se encuentra a los 170 m.

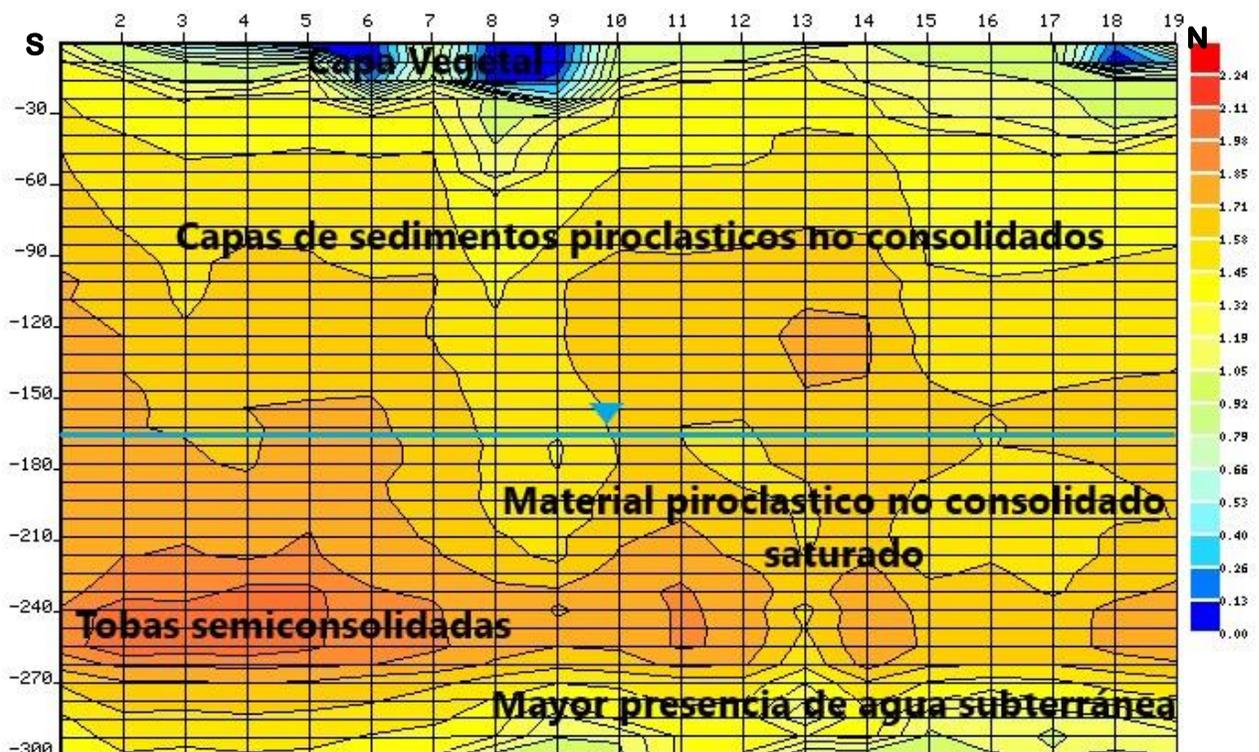


Figura 43. PEM15. Lomas de Santo Domingo.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

En la **Tabla 20**, se muestran los perfiles pertenecientes a la sección D-D'EM. Localizados en la parte alta de la Subcuenca II.

Tabla 20. Sección D-D'EM

| PEM | Ubicación | Long (m) |
|-------|-------------------------|----------|
| PEM13 | Pochocuape-Las Mercedes | 100 |
| PEM14 | Intermezzo del Bosque | 130 |

PEM13. Pochocuape-Las Mercedes.

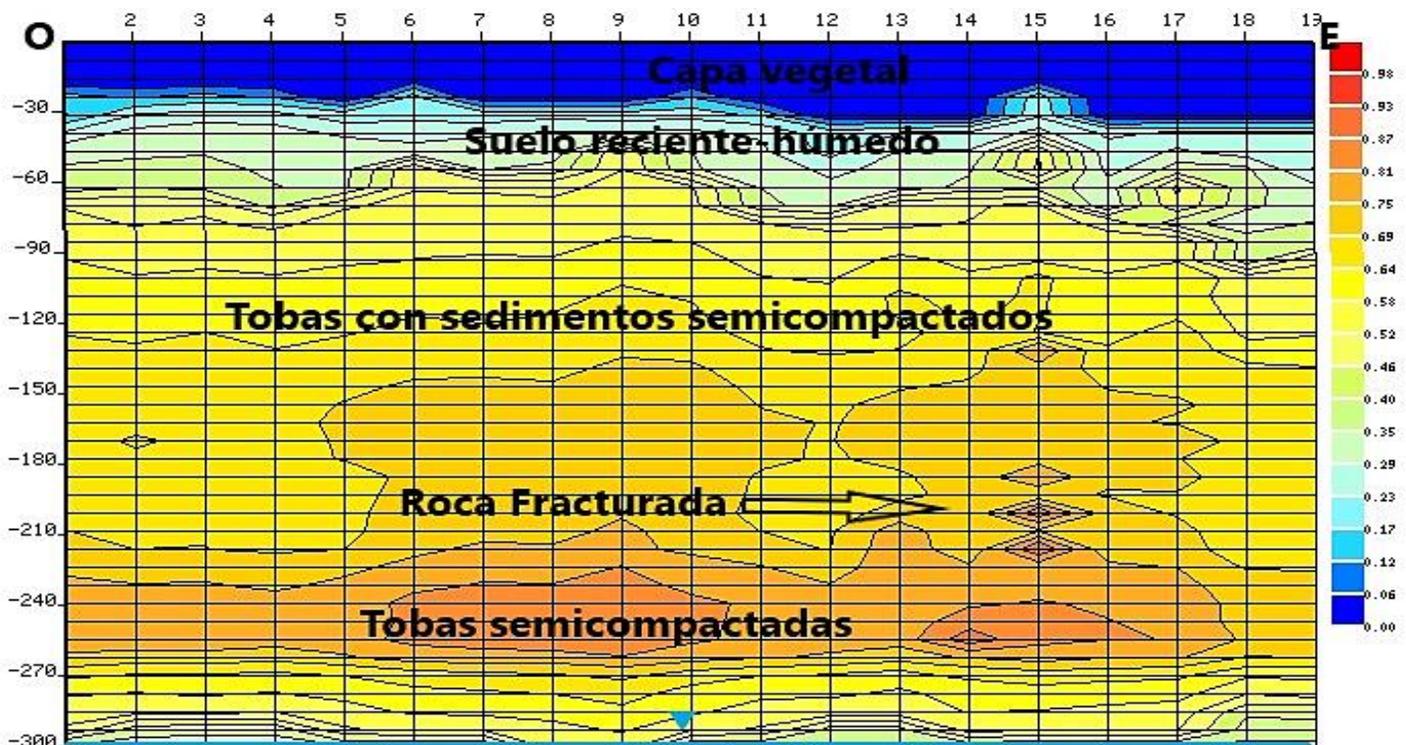


Figura 44. PEM13. Pochocuape – Las Mercedes.

Figura 44. El perfil EM, muestra valores correspondientes de 0.00-0.12, representando una capa de suelo reciente, con 40 metros de espesor máximo hacia el Este. Así mismo, se puede observar una capa de suelo no consolidado con cierto contenido de humedad entre los 30 y 60 metros, representados por valores que van de 0.17 a 0.46. Los valores de 0.52-0.75, corresponden a capas de material piroclasto con sedimentos semicompactados. Es importante mencionar que en este punto no se aprecian espesores saturados debido a la elevación, de acuerdo con el

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

mapa de proceso indica que el agua subterránea puede encontrarse a los 300 metros de profundidad y en la estación 15 a los 210 m se puede observar capas de rocas fracturadas.

PEM14. Intermezzo del Bosque

Figura 45. Presenta valores de 0.00-0.47, correspondientes a un suelo reciente, los cuales se muestran al Este del levantamiento, así mismo, muestra valores de 0.66-0.94, pertenecientes a capas de sedimentos sueltos no compactados, al igual, que los valores de 1.03-1.22, que representa a capas de sedimentos piroclastos no compactados. En el costado Este del perfil a los 240 y 270 m de profundidad se puede observar una capa de toba semicompactada, la cual se ubica por encima del nivel saturado.

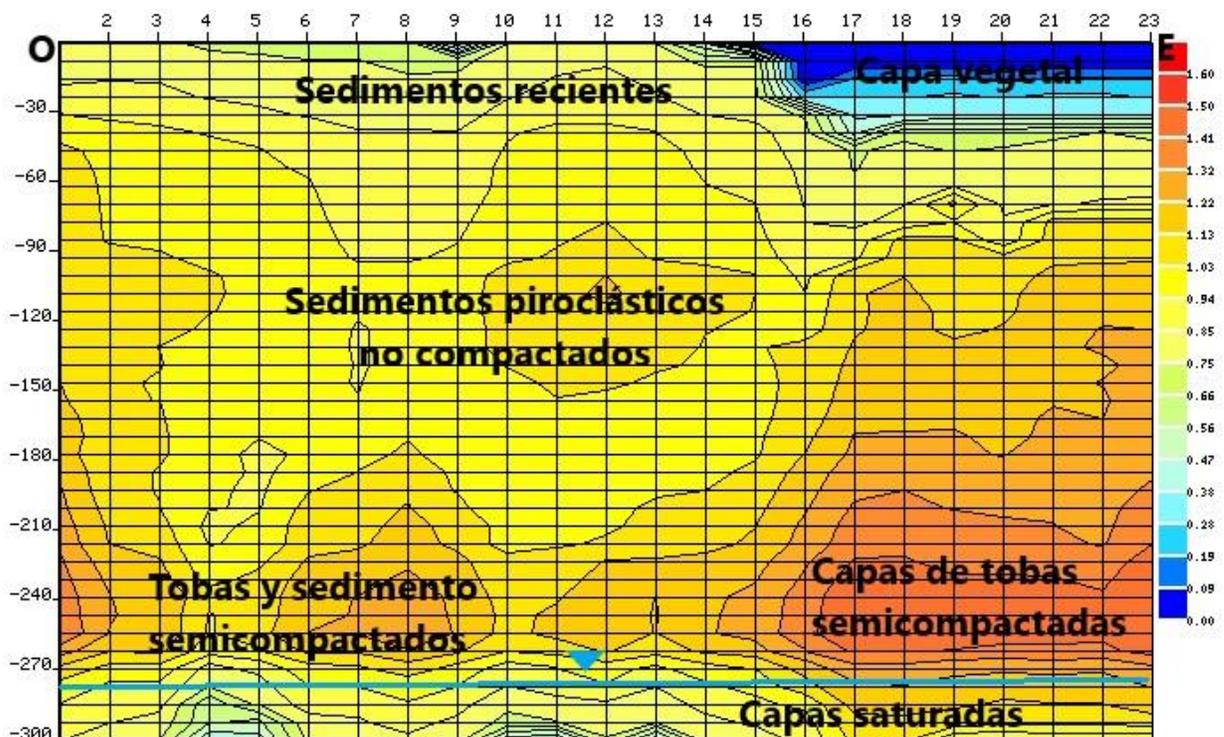


Figura 45. PEM14. Intermezzo del Bosque.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Clasificación de los rangos de valores del potencial eléctrico natural.

De manera general, se puede concluir que las características del suelo, obtenida a partir de los levantamientos electromagnéticos, presentan rangos de potencial eléctrico variado según su ubicación topográfica. Por lo cual se han clasificado dichos rangos de potencial eléctrico de acuerdo a las secciones A-A'EM, B-B'EM, C-C'EM, y D-D'EM definidas según su secuencia dentro de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua.

Rangos de valores para la sección A-A'EM, ubicada al Norte de la subcuenca, de manera perpendicular, cercana al lago de Managua, se caracteriza por poseer los siguientes potenciales eléctricos:



Figura 46. Rangos de potencial eléctrico A-A'EM

Rango de potencial eléctrico de 0.00-0.71mV, representa a capas limosas o suelos recientes sueltos (tonalidades azules y celestes).

Rango de potencial eléctrico de 0.71-1.62mV, son características de capas de sedimentos aluviales y lacustres no compactados, con cierto contenido de humedad (tonalidades verdes claras).

Rango de potencial eléctrico de 1.62-2.42mV, están representados por sedimentos lacustres y aluviales saturados (tonalidades amarillas a naranja).

Rango de potencial eléctrico de 2.32-3.03Mv, representan capas de rocas semicompactadas de sedimentos, las cuales se encuentran saturadas.

En esta secuencia de perfiles no se logra identificar potencial eléctrico de 3.23 a 3.44 mV, representada por tonalidades rojas, y los valores de nivel de agua subterránea se encuentran entre 10 a 40 metros de profundidad.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Rasgos de valores para la sección B-B'EM y C-C'EM, localizada al Sur de la Laguna de Asososca y Tiscapa, en la parte media de la subcuenca, se caracteriza por los siguientes valores de potencial eléctrico:



Figura 47. Rango de valores de la sección B-B'EM y C-C'EM.

Rango de potencial eléctrico de 0.00-1.19mV, identifica capas de suelo suelto o capas de suelo vegetal (representas por tonalidades azul a azul clara a verde).

Rango de potencial eléctrico de 1.19-1.64mV, constituyen los sedimentos aluviales y piroclásticos no compactados con cierto grado de humedad (tonalidad amarillo claro-amarillo fuerte).

Rango de potencial eléctrico de 1.64-2.23mV, lo conforman materiales piroclastos saturados, tobas semicompactadas (tonalidades amarillo oscuro a naranja).

Rango de potencial eléctrico de 2.23-2.38 mV, son característicos de tobas y escorias semicompactadas y saturadas (tonalidad naranja fuerte).

En esta secuencia al igual que la anterior no se logra identificar valores mayores a los mencionados, como los representados por el color rojo, que son característicos de una roca masiva y compactada. Los valores de nivel de agua para esta área van de 90 m a 170 m de profundidad.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Rasgos de valores para la sección D-D'EM, localizada en la parte media alta y alta de la Subcuenca II, se caracteriza por los siguientes valores de potencial eléctrico:

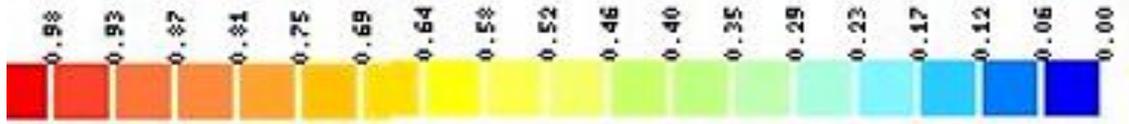


Figura 48. Rango de valores para la sección D-D'EM

Rango de potencial eléctrico de 0.00-0.52 mV, representan a una capa de suelo reciente suelto, muy superficial (tonalidad azul a verde clara).

Rango de potencial eléctrico de 0.52-0.87mV, características de materiales tobáceos con sedimentos no compactados, sin saturación de agua (amarillo claro a amarillo fuerte).

Rango de potencial eléctrico de 0.87-0.93mV, se identifican tobas semicompactadas y fracturadas, con poca circulación de agua subterránea.

No se identifican rangos mayores de estos. El nivel del agua subterránea se identifica entre 260 m a 300 m de profundidad.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

4.1.5. Modelo hidrogeológico de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua

Mediante la clasificación y delimitación de las unidades hidrogeológicas en las secciones establecidas dentro del área de estudio, a través de la interpretación de los paquetes litológicos, se logró establecer el modelo hidrogeológico tridimensional donde se representan las unidades hidrogeológicas que se encuentran conformando la Subcuenca II.

Sin embargo, para poder identificar y plasmar la incidencia de los flujos locales, intermedios y regionales dentro del área, fue necesario aplicar la teoría de los sistemas de flujo según Tóth (2000), el cual menciona que los parámetros que rigen el funcionamiento del agua subterránea bajo el efecto gravitacional son: clima, topografía y referente geológico, los cuales permiten la formación de estos tres sistemas de flujos subterráneo, en los que el tiempo de residencia del agua subterránea es de menor a mayor, respectivamente (Alconada et al., 2011).

Estos flujos presentan cada uno su zona de recarga, tránsito y descarga particular. Comparando la respuesta físico-química de un flujo local con uno regional, el último presenta mayor profundidad y distancia de recorrido lo que le permite tener mayor interacción agua-roca; por tal razón, el agua en su zona de descarga presenta mayor temperatura, menor contenido de oxígeno disuelto, mayor salinidad y pH más alcalino. Generalmente, la descarga de este tipo de sistema de flujo se manifiesta en una cuenca hidrográfica diferente a aquella donde se originó la recarga.

En la Figura 49, se puede observar un modelo establecido por Tóth (2000), de flujos subterráneos para una cuenca regional.

Para el acuífero de Managua las características predominantes de agua subterránea son de tipo bicarbonatadas-cálcicas-magnésicas y/o bicarbonatadas cálcicas. Particularmente para la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, las características hidroquímicas son las siguientes:

- En zonas más altas (zonas de recarga), predominan las aguas de tipo bicarbonatadas magnésicas ($\text{HCO}_3\text{-Mg}$ y/o $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$), asociadas a flujos regionales.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- En zonas intermedias, son de tipo bicarbonatadas sódicas cálcicas y/o bicarbonatadas cálcicas sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ y/o $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$), asociadas a flujos intermedios y con algunos locales, así mismo, establece la zona de tránsito dentro de la cuenca. En algunos sitios se presentan aguas cloruradas cálcicas (como una zona de mezcla con flujos intermedios y regionales).

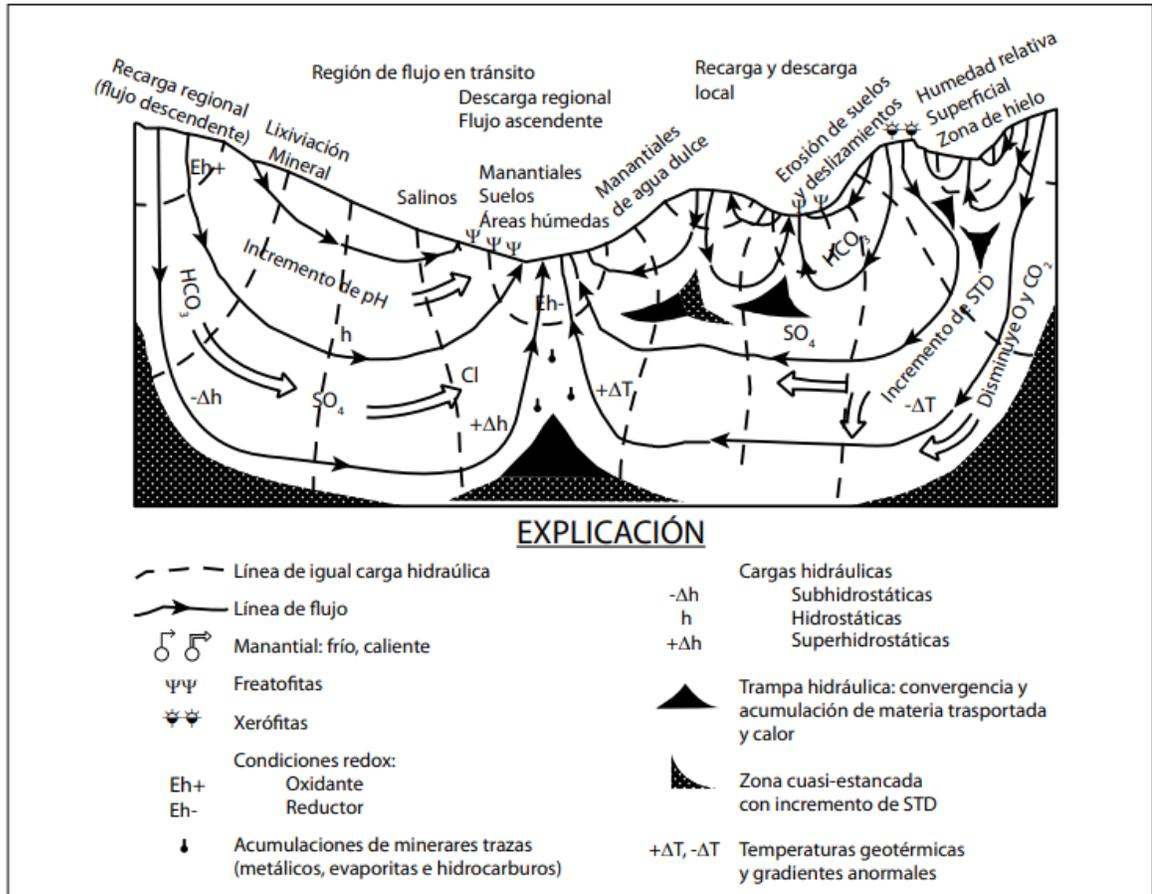


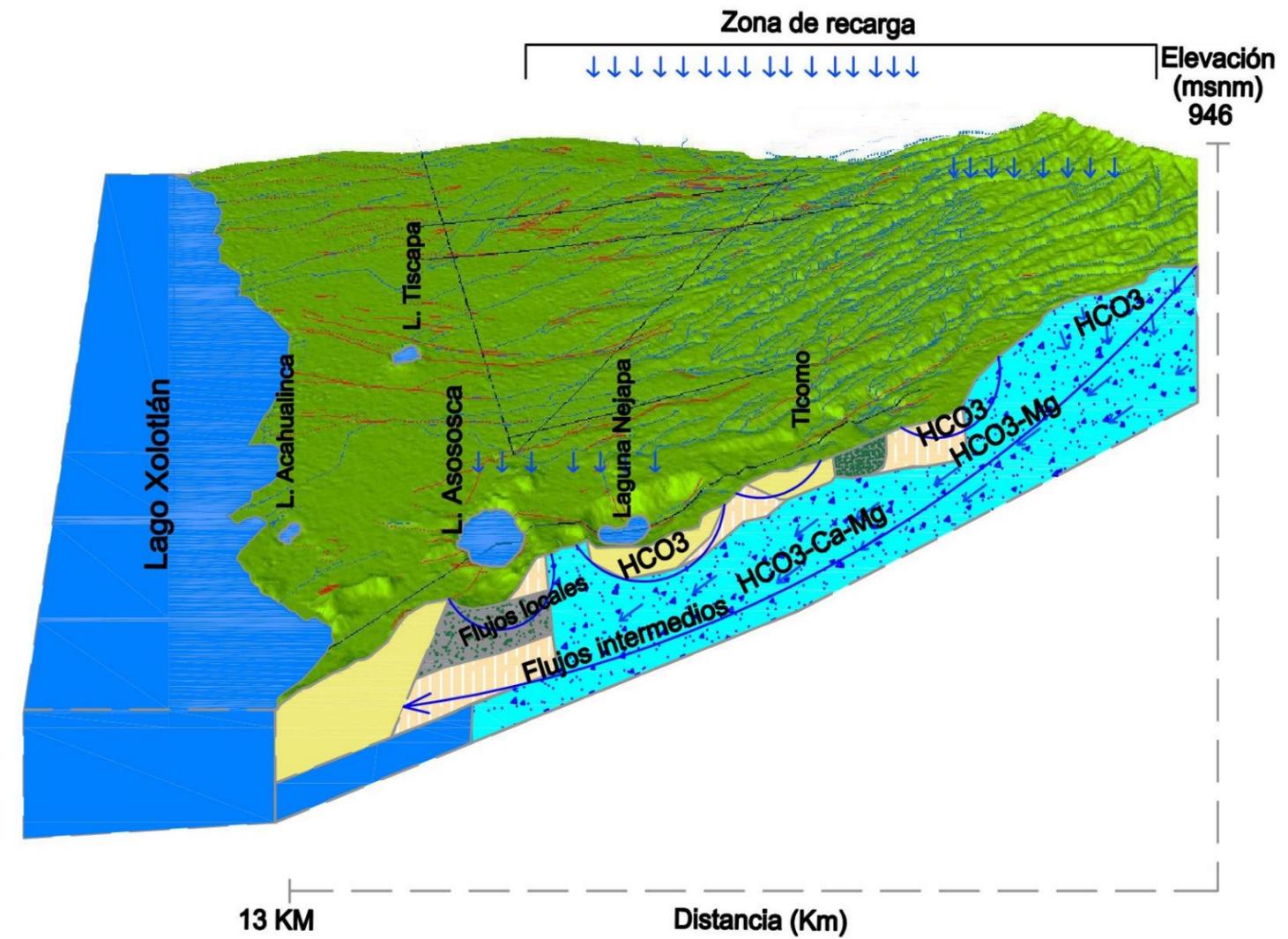
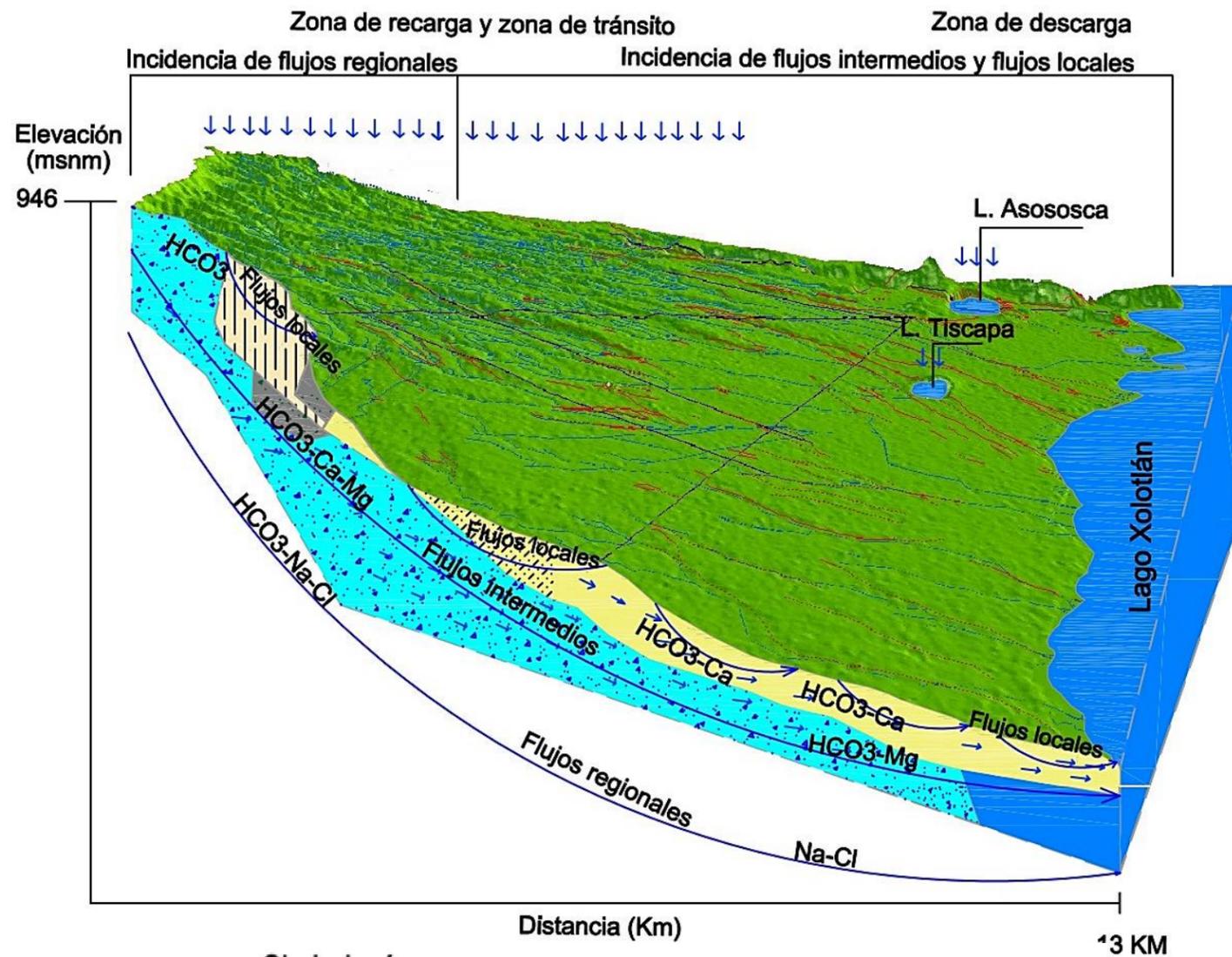
Figura 49. Modelo del sistema de flujo en una cuenca regional.

Fuente: Tóth, (2000)

- En Zonas bajas, es considerada como las zonas de descarga (cerca al lago de Managua), predominan las aguas bicarbonatadas sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$).

En la Figura 50, se muestra la representación del modelo hidrogeológico para la Subcuenca II, de la Cuenca Sur del lago de Managua.

MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA SUBCUENCA II, CUENCA SUR DEL LAGO DE MANAGUA.



Simbología

- Unidad 1. Depósitos no consolidados
- Unidad 2. Depósitos pobremente consolidados
- Unidad 3. Depósitos moderadamente consolidados
- Unidad 4. Depósitos parcial a moderadamente consolidados
- Unidad 5. Depósitos consolidados
- Líneas de dirección del flujo subterráneo
- Fallas
- Perfiles hidrogeológicos
- Drenaje superficial

CAPÍTULO V

5.1. DISCUSIÓN

Debido a la complejidad estructural en que se encuentra la ciudad de Managua, la litología del área de estudio, ha sido objeto de investigación por diversos autores, los cuales han logrado describir los depósitos piroclásticos que conforman el basamento en el cual se encuentra asentada dicha ciudad. Puntualmente, la hidrogeología de la zona ha sido estudiada y caracterizada de acuerdo a estos paquetes litológicos.

Para Castillo et al. (2006), el espesor del acuífero de Managua es de 400 a 600 m; así mismo, afirma que este se encuentra compuesto por una sucesión de depósitos piroclásticos semi - consolidados, y permeables del Pleistoceno, sobre puesto por capas delgadas de aluviones y coluviales del Pleistoceno – Oligoceno, con permeabilidad mayor a 10 m/día, de igual forma, considera que dicho acuífero alcanza un potencial de 447.016,95 m³/día; por lo que infiere posee un carácter altamente productivo.

No obstante, Krásný y Hecht, (1998), habían descrito estos acuíferos como un conjunto de acuíferos estratiformes porosos, alternados con acuitardos del grupo Las Sierras, depósitos Cuaternarios de origen volcánico y depósitos aluviales, donde las características predominantes de agua subterránea son de tipo bicarbonatadas-cálcicas-magnésicas y/o bicarbonatadas, bicarbonatadas sódicas cálcicas y/o bicarbonatadas cálcicas sódicas.

Las principales características de estas formaciones acuíferas según, JICA & INAA, (1993), son tres: Los depósitos aluviales con material piroclásticos Cuaternario, el grupo volcánico Masaya y el grupo Las Sierras Medio, siendo este último la principal formación geológica donde se da la ocurrencia de los flujos subterráneos por rocas aglomeradas fracturas, con suelos fósiles de los aglomerados basálticos-andesíticos compactados de tobas y tobas brechosas; así como en capas porosas permeables de flujos piroclásticos y depósitos de piroclásticos caídos (capas de escoria). De tal manera que las formaciones hidrogeológicas se dan principalmente

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

como acuíferos libres y semiconfinados. Finalmente, los flujos subterráneos dentro del área varían según topografía, como lo menciona Martínez & Chevez, (2017), donde la dirección y velocidad de flujo subterráneo se rige estrictamente por la naturaleza geológica del medio, con dirección preferencial N-S (hacia el lago). Las unidades hidrogeológicas caracterizadas en este trabajo están definidas por las características litológicas de los diferentes paquetes encontrados en los pozos del área de estudio, los cuales presentan propiedades similares a las descritas por otros autores.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

CAPÍTULO VI

6.1. CONCLUSIÓN

En base al “*Mapa Geológico de Managua y sus alrededores*”, de escala 1: 50,000, definido por INETER (2007), y el mapa geológico del campo volcánico Nejapa en el occidente de la ciudad, elaborado por Avellán, (2009), se presenta un mapa geológico unificado de escala 1: 80,000 para el área de estudio de la Subcuenca II, Cuenca Sur de Managua, que muestra las principales unidades y estructuras geológicas dentro de ella.

No obstante, con el fin de definir el modelo hidrogeológico conceptual del área, se ha realizado una caracterización de las unidades hidrogeológicas que se encuentran dentro de esta subcuenca, elaborado a partir de datos litológicos de pozos y del análisis de identificación de acuerdo a sus características físicas distintivas, dando como resultado la clasificación de 5 unidades hidroestratigráficas o hidrogeológicas para la Subcuenca II, tales son:

Unidad 1. Depósitos no consolidados. Formado principalmente por depósitos lacustres. Estos están compuestos por limos, arenas limosas, arenas finas a medias, suelos fósiles, arena media a gruesa semicompactada, arenas con fragmentos de escoria y pómez.

Unidad 2. Depósitos pobremente consolidados. Constituidos por piroclastos de caída, Suelos fósiles, cenizas, tobas arenosas semicompactadas, arenas gruesas a media semicompactadas, escoria y arena intercalada.

Unidad 3. Depósitos moderadamente consolidados. Formados por combinación de depósitos piroclastos de caída y de flujos. Compuestos por tobas meteorizadas como tobas limosas con escoria, tobas limosas andesitas, tobas arenosas gruesas con limolita e intercalaciones de paleosuelos. Así mismo, presenta tobas compactadas e ignimbritas con fragmentos angulares.

Unidad 4. Depósitos parcialmente a moderadamente consolidados. Formados por depósitos de flujo piroclástico. Estos depósitos están caracterizados por la presencia de tobas líticas o aglomeráticas semicompactadas a compactadas, tobas

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

aglomeradas fracturadas, andesitas con intercalaciones de toba arenosa, andesitas fracturadas, arenas gruesas compactadas con fragmentos angulares, capas de arena gruesa compactada con limos y finalmente, tobas compactadas con intercalaciones de arena gruesa con fragmentos angulares de escoria.

Unidad 5. Depósitos consolidados. Formado principalmente por depósitos de lava. Compuesta por depósitos de composición basáltica a andesítica, con capas de escoria basáltica, tobas andesitas compactadas y en algunos casos con intercalación de andesitas fracturada.

Por otro lado, se ha logrado identificar y determinar las zonas de flujo local, intermedio y regional, de acuerdo a la metodología teórica propuesta por Tóth, (2000), así como, por el procesamiento de los datos de nivel de agua subterránea recopilado para este estudio. Dando como resultado lo siguiente:

Los flujos regionales: se presentan a profundidades mayores de los a 285 msnm, ubicado por debajo del área montañoso de la Subcuenca II (área Sur de Managua).

Los flujos intermedios: se presentan con valores de profundidad de agua subterránea que va desde los 96 a 212 msnm, conformando así la zona de tránsito.

Los flujos locales: estos están controlados por la pendiente y presentan valores más someros del agua subterránea, los cuales están entre 0-96 msnm, reconociendo las zonas de recarga hacia el lago de Managua.

Finalmente, a través de la aplicación del método electromagnético, se logra sustentar los resultados del flujo subterráneo y la caracterización de las unidades hidrogeológicas definidas para el área de estudio. Por lo que se reconocen tres rangos de valores de potencial eléctrico característicos para la zona, según la ubicación topográfica. Los cuales están clasificados en: Rangos de potencial eléctrico en zonas bajas, Rangos de potencial eléctrico en la zona media-alta y Rangos de potencial eléctrico para la parte alta de la subcuenca, los cuales se describen como:

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

Rangos de potencial eléctrico natural para las zonas bajas

- **Rango de potencial eléctrico de 0.00-0.71mV**, representa a capas limosas o suelos recientes sueltos.
- **Rango de potencial eléctrico de 0.71-1.62mV**, son características de capas de sedimentos aluviales y lacustres no compactados, con cierto contenido de humedad.
- **Rango de potencial eléctrico de 1.62-2.42mV**, están representados por sedimentos lacustres y aluviales saturados.
- **Rango de potencial eléctrico de 2.32-3.03mV**, representan capas de rocas semicompactadas de sedimentos saturados.

Encontrando agua subterránea entre valores de 10 y 40 m de profundidad.

Rangos de potencial eléctrico natural para las zonas media-alta

- **Rango de potencial eléctrico de 0.00-1.19mV**, identifica capas de suelo suelto o capas de suelo vegetal.
- **Rango de potencial eléctrico de 1.19-1.64mV**, constituyen los sedimentos aluviales y piroclásticos no compactados con cierto grado de humedad.
- **Rango de potencial eléctrico de 1.64-2.23mV**, lo conforman materiales piroclastos saturados, tobas semicompactadas.
- **Rango de potencial eléctrico de 2.23-2.38 mV**, son característicos de tobas y escorias semicompactadas y saturadas.

El agua Subterránea se encuentra entre 90 m y 200 m de profundidad.

Rangos de potencial eléctrico natural para zonas altas

- **Rango de potencial eléctrico de 0.00-0.52 mV**, representan a una capa de suelo reciente suelto, muy superficial.
- **Rango de potencial eléctrico de 0.52-0.87mV**, características de materiales tobáceos con sedimentos no compactados, sin saturación de agua.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- **Rango de potencial eléctrico de 0.87-0.93mV**, se identifican tobas semicompactadas y fracturadas, con poca circulación de agua subterránea. No se identifican rangos mayores de estos.

Niveles de agua subterránea entre 200 m a mayores de 300 m de profundidad.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

6.2. RECOMENDACIONES

Para poder evaluar la vulnerabilidad en que se encuentran los acuíferos de la Subcuenca II, Cuenca Sur del lago de Managua, se recomienda realizar detalladamente un inventario sobre los contaminantes que pueden estar afectando a estos acuíferos, clasificándolos según sus características físicas y químicas (sean líquidos o sólidos), así mismo, sería de importancia identificar los puntos de contaminación dentro del área, para poder proteger los acuíferos libres de la subcuenca. Por otro lado, se recomienda realizar monitorios químicos en los diferentes pozos que se encuentran localizados frente el borde Norte de la subcuenca (paralelo al lago de Managua), con el fin de analizar la calidad de las aguas de esta zona y determinar si hay inmersión de flujo del lago de Managua hacia el acuífero.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

CAPÍTULO VII

7.1. BIBLIOGRAFÍA

- Alconada, M., Reyneiro, J., Castillo, F. y Carrillo, J. (2011, abril). *La definición de flujos de agua subterránea en la elección de prácticas de manejo del suelo*. IX Congreso Cubano de Geología. La Habana.
- ALMA. (2017). *Plan maestro de escorrentía superficial (PMES) del municipio de Managua*. Managua, Nicaragua.
- ANA. (2010). *Ley general de las aguas nacionales, Ley N°620*. Managua, Nicaragua.
- Avellán, D. (2009). *Tefroestratigrafía de la parte occidental de Managua, Nicaragua: evolución de las estructuras volcánicas de Ticomo, Nejapa y Asososca*, tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM, México.
- Avellán, D., Macías, JL., Sosa-Ceballos, G., Velásquez, G. (2014). *Estratigrafía, química y dinámica eruptiva de la erupción pliniana 12.4 ka del Volcán Apoyeque*. Managua, Nicaragua. Bull Volcanol. 76:792.
- Bermúdez, W., Blandón, E. (1992). *Marco geológico de la ocurrencia del terremoto en Nicaragua, Centroamérica*. J. Geol. Soc. Japón, 98, 165-176; Tokio.
- Bunduschuh, J., Alvarado, G. (2007). *Centroamérica: geología, recursos y peligros*. Londres. Vol. 1, p. 663.
- Carr, M. J., M. D. Feigenson, L. C. Patino y J. A. Walker. (2003). *“Vulcanismo y geoquímica en Centroamérica: avances y problemas”*, American Unión Geofísica, Monografía Geofísica.
- Castillo, E., Calderón, H., Delgado, V., Flores, M., y Salvatierra, T. (2006). *Situación de los recursos hídricos en Nicaragua*. Boletín Geológico y Minero, 117(1):127-146.
- Castillo, E., Calderón, H., Delgado, V., Flores, Y., Salvatierra, T. (2006). *Situación de los recursos hídricos en Nicaragua*. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 127-146.
- CENAGRO. (2011). *Caracterización Agropecuaria del Municipio de Managua. IV Censo Nacional Agropecuario-IV CENAGRO*, 1:11-34.
- Custodio, E. y Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea*, 2350 pp. (2 tomos). Sistemas y modelos. cap.16.1 (pp 1577-1583). Omega. Barcelona.
- Darce, M., y Duarte, M. (Julio 2002). *Geología de la Cuenca Sandino en Costa dentro, Nicaragua*. Centro América.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- DeMets, C. (2001). *Una nueva estimación para el actual movimiento de las placas Coco-Caribe: implicaciones para el deslizamiento a lo largo del Arco volcánico centroamericano*. Geophys. Res. Lett. 28, 40434046; Washington.
- Denyer, P. (2006). *Geología y Geotectónica de América Central y El Caribe*. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, Apdo. 2142060 UCR, Costa Rica.
- Elming, S. (1998). *Estudio paleomagnético y determinaciones de edad K-Ar en rocas terciarias de Nicaragua, Centro América*. Universidad Tecnológica de Lulea, Suecia, no. 0, p. 1-19.
- Espinoza, F. (2007). *Neotectónica de la Falla Nejapa porción Oeste del Graben de Managua, Nicaragua*. México, D.F.
- Estrada, L. (2012). *Prospección geoelectrica*. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina.
- FDEM. *Método electromagnético en el dominio de las frecuencias*. Pdf. S.f. recuperado el 7 de diciembre del 2020 de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/09.pdf?sequence=10&isAllowed=y>.
- Frez, J., y Gamez, E. (2008). *Aspectos de la sismotectónica de Nicaragua y su alrededor*. CICESE. México.
- Frischbutter, A. (2002). *Estructura del graben de Managua, Nicaragua, a partir de imágenes de teledetección*. Geofísica Internacional, v. 41, pág. 87.102. Alemania.
- FUNCOD. (1996). *Proyecto de Conservación de Suelos y Agricultura Sostenible en la Microcuenca D, Subcuenca II de la Cuenca Sur del Lago de Managua*. Managua, Nicaragua.
- Gutiérrez C. (2018). *Aplicaciones a la Meteorología*. Recuperado el 7 de julio de <http://www.ineter.gob.ni/Direcciones/meteorologia/estudios/caracterizacion climática de managua.htm>.
- Hernández, F. (2012). *Variaciones de los niveles estacionales del agua subterránea y propiedades hidráulicas de las unidades geológicas que se comportan como acuífero en el área Oeste de Managua*. Managua, Nicaragua.
- Hispagua. (14 de Julio 2020). *Sistema Español de Información sobre el Agua*. Recuperado el 5 de julio de: <http://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia>.
- Hodgson, G. (2000). *Geología Regional de Nicaragua*. Managua, Nicaragua.
- Hradecky et al., (1997). *Geología y amenaza geológica en Managua, Nicaragua*, Cwch Geological Service and Ineter, Pragua-Managua.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- IDEAM. (2014). *Modelación Hidrogeológica*. Bogotá, Colombia. (En línea) Recuperado el 15 de agosto 2020, de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>
- IMC (Consortio International MarConsult Inc). (2010, marzo). *Proyecto para la protección ambiental y control de la contaminación originada en el transporte marítimo en el Golfo de Honduras*. Cap.1 y 2. p.6
- INETER. (2002, abril). *Actualización del Mapa de Fallas Geológicas de Managua*. Managua, Nicaragua.
- INETER. (2016). *Caracterización Geográfica Del Territorio Nacional*. Managua, Nicaragua.
- INETER. (2016). *Ley N° 59, Ley de División Política Administrativa y sus Reformas*. Managua, Nicaragua.
- INETER., & BGR. (2007). *Mapa geológico de Managua y sus alrededores, Escala 1:50,000*. Managua, Nicaragua.
- INETER., ANA., UNI., GIZ-PROATAS. (2014). *Delimitación de cuencas hidrográficas en Nicaragua bajo la metodología Pfatstetter*. Managua, Nicaragua.
- INIDE., y MAGFOR. (2013, mayo). *Departamento de Managua y sus municipios, uso de la tierra y el agua en el sector agropecuario*. Managua, Nicaragua.
- Jarrard, R. (1986). *Relaciones entre subducción parámetros*. Rev. Geophys., 24 años, 217-284.
- JICA., y INAA. (1993). *Estudio sobre proyecto de abastecimiento de agua en Managua*. Managua, Nicaragua.
- Krásný, J. y Hecht G. (1998). *Estudios hidrogeológicos e hidroquímicos de la región del Pacífico de Nicaragua*. COSUDE, INETER y GTZ. Managua, Nicaragua.
- Kutterolf, S., A. Freundt, W. Pérez, H. Wehrmann y H.U. Scmincke. (2007). *"Pleistoceno tardío al Holoceno sucesión temporal y magnitudes de erupciones volcánicas altamente explosivas en el centro-oeste de Nicaragua"*, Revista de Investigación de Vulcanología y Geotermia vol. 163, págs. 55-82.
- La Femina, P. y W. Strauch (2002). *"Bookshelf faulting en Nicaragua"*, Sociedad Geológica de América, vol. 30, No. 8, p. 751-54.
- López, Y. (19 de enero, 2015). "Boom" en la Jean Paul Genie. *LA PRENSA*. Recuperado el 5 de julio de <https://www.laprensa.com.ni/2015/01/19/economia/1767230-lboom-en-la-jean-paul-genie-boom-en-la-jean-paul-genie>

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- Sequeira, L., (2011). *¿Por qué falta el agua en Malacatoya?*. Tierra, Revista del Instituto de Geología y Geofísica (IGG – CIGEO / UNAN -Managua- Año 14, No, 24, mayo de 2011, 16 – 19.
- MARENA and KTH. (2000a). *Vulnerabilidad Hidrogeológica del Acuífero de Managua, Uso sustentable de los recursos hídricos SUWaR*. Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales. Kungliga Tekniska Högskolan (Royal Institute of Technology). Managua.
- Martínez, G. (2012). *Análisis Morfoestructural del Graben de Managua y sus alrededores*. Managua.
- Martínez, B., Noguera, B. (1992). *Marco Geológico de ocurrencia de terremotos en Nicaragua*. J. Geol. Soc. Japón, 98, 165-176.
- Martínez, D., Chevez, M. (2017). *Caracterización hidrogeológica de la parte noroeste del acuífero Las Sierras*. Managua, Nicaragua.
- Martínez, R. (2005). *Balance de la Sub Cuenca Central del Acuífero de Managua utilizando Software FLOWPATH II*. UNI. Managua, Nicaragua.
- McBirney, A., Williams, H. (1965). *Historia volcánica de Nicaragua*. University of California Publications in the Geological Sciences, v.55, p. 1-69.
- Molnar, P., Sykes, L. (1969). *Tectónica de la región del Caribe y América Central a partir de mecanismos focales y sismicidad*. Geol. Soc. Am. Bull., 80, 1639-1684.
- Monreal, R., Medina, M., Montoya, A., Sosa, I., Montaña, M. (2010). *Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas: caso del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora, México*.
- Mora, J. (2006, junio). *Evaluación del estado actual de la eutrofización antrópica de la Reserva Natural Lago de Tiscapa en la estación seca y lluviosa del año 2005*. Managua, Nicaragua.
- Navarro, A. (2010). *Conceptos básicos de Hidrología*. España: Instituto Tecnológico Geominero de España (IGME).
- Ordoñez. J. (2011). *Agua subterránea - Acuífero*. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Cruz, O. 1997. Modelaje del acuífero de Managua y su rendimiento sostenible. Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica.
- Pardo, N., Avellán, D., Macías, JL., Scolamacchia, T., Rodríguez, D. (2008). *El maar de Asososca de 1245 años BP: nuevos avances en estratigrafía volcánica*

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

- reciente de Managua (Nicaragua) e implicaciones de peligro.* Revista de Investigación de Vulcanología y Geotermia vol 176 (4): 493 – 512.
- Pérez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico.* Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas, Venezuela. p. 38.
- Pérez, W., Freundt, A. (2006). *Las erupciones basálticas altamente explosivas más jóvenes de Masaya Caldera (Nicaragua).* En: Rose, WI, Bluth, GJS, Carr, MJ, Ewert, JW, Patino, LC, Vallance, JW (Eds.), Peligros volcánicos en América Central. Geol. Soc. A.m. Especificaciones. Pap., Vol. 412, págs.189 – 207.
- Pérez, W., Freundt, A., Kutterolf, S., Schmincke, H. (2009). *La Triple Capa de Masaya: Una erupción pliniana multiepisódica basáltica de 2100 años del Complejo Masaya Caldera (Nicaragua).* Revista de investigación de vulcanología y geotermia. Vol. 179, p.191-205.
- Saucedo, U. (2003). *Clasificación de texturas y parámetros mecánicos de suelos.* México. D.F
- Sevilla, S. (2016). *Mapa Metalogénico de Nicaragua.* Managua, Nicaragua.
- USACE. (2001, mayo). *Evaluación de recurso de agua de Nicaragua.* Nicaragua. (pp. 48).
- Velásquez., G., I. Alcántara A., JR Hernández S. y RJ Garnica P. (2015), “*La zonificación morfotectónica-volcánica en el análisis morfoestructural del relieve: el caso del municipio de Managua, Nicaragua*”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 87, Instituto de Geografía, UNAM, México, (pp. 118-140).
- Weinberg, R. (1992). *Desarrollo neotectónico del occidente en Nicaragua.* Tectónica, 11, 1010-1017; Washington.
- White, R., Harlow, D. (1993). *Terremotos destructivos de la corteza superior de América Central desde 1900.* BSSA, vol. 83, pp. 115-1142.

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

7.2. ANEXOS

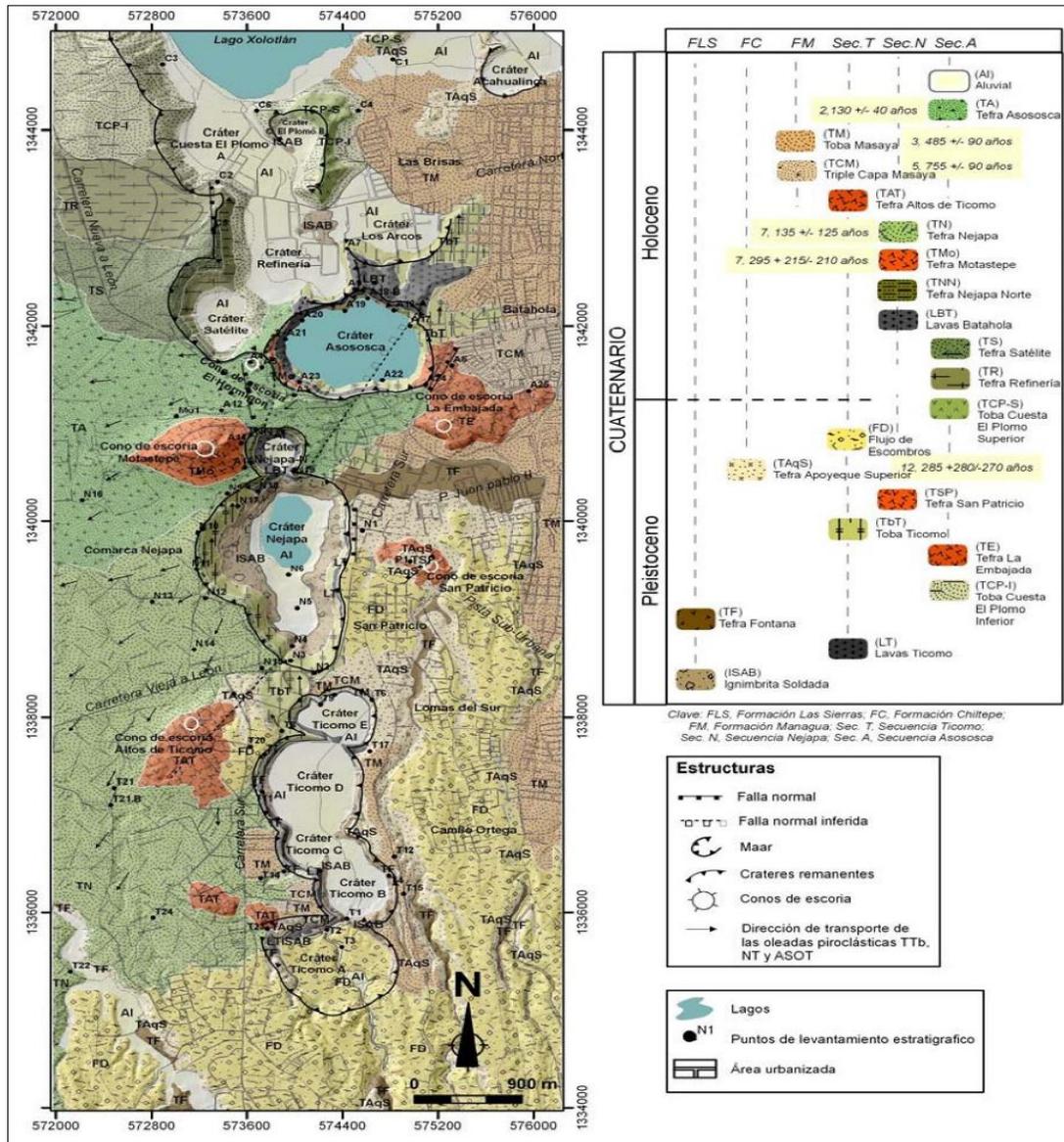


Figura 51. Mapa geológico del campo volcánico Nejapa.

Fuente: Avellán, (2009).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

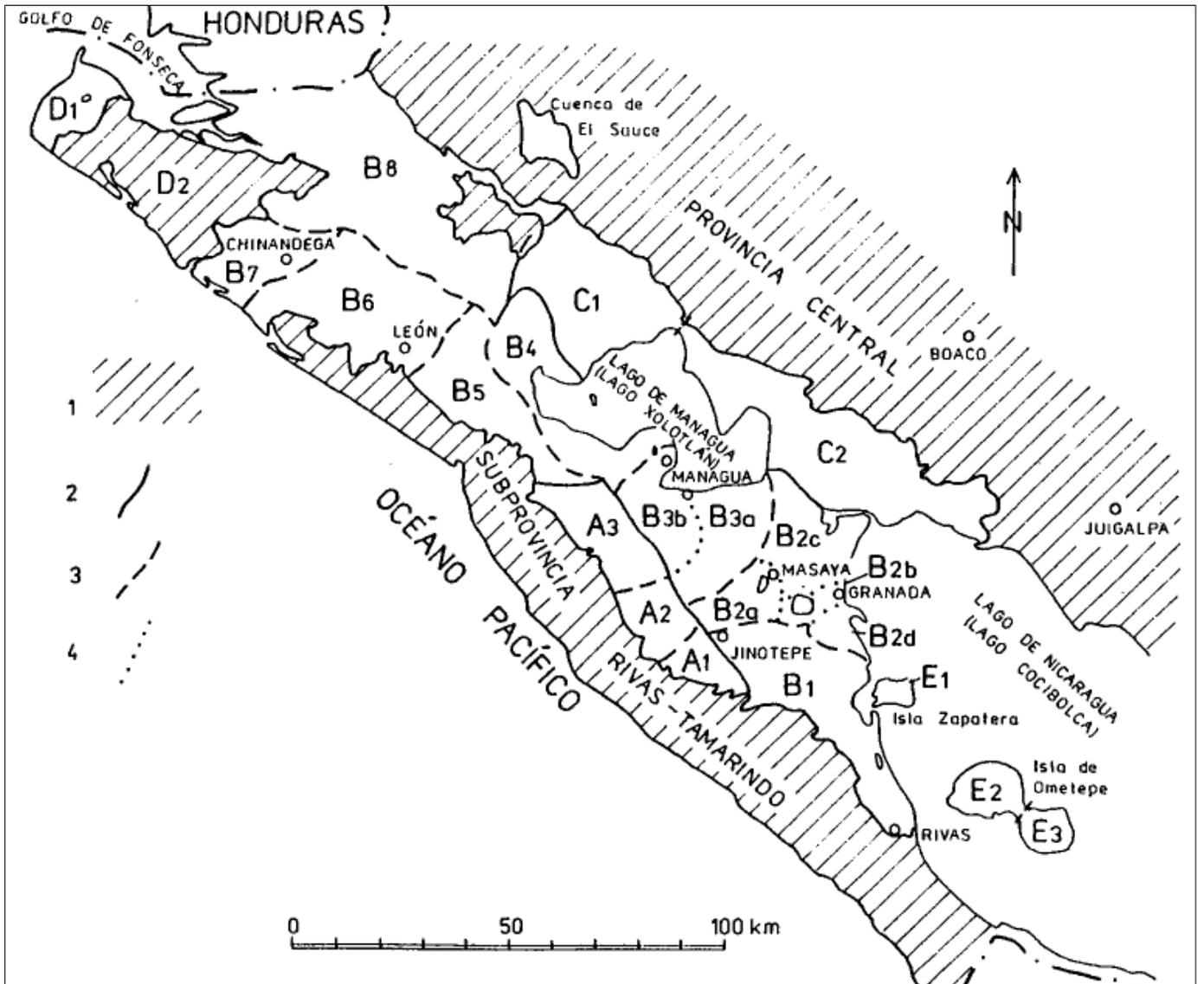


Figura 53. Subsistemas de acuíferos de la subprovincia hidrogeológica del graben de Nicaragua.

Fuente: Krazný & Hecht (1998)

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

| Estación/Recarga (mm) | La Primavera | San Isidro de la Cruz Verde | El Campbell | Aeropuerto |
|---|----------------|-----------------------------|-------------|------------|
| Enero | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Febrero | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Marzo | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Abril | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Mayo | 1.5931 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Junio | 40.9500 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Julio | 11.8747 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Agosto | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Septiembre | 74.5140 | 11.5150 | 11.2960 | 10.6212 |
| Octubre | 176.9256 | 31.8834 | 29.4542 | 26.6466 |
| Noviembre | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Diciembre | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Total (mm) | 305.8573 | 43.3983 | 40.7501 | 37.2677 |
| Total (m) | 0.3058 | 0.0433 | 0.0407 | 0.0372 |
| Área en km ² | 241 | | | |
| Área en m ² | 241,000,000 | | | |
| Recarga m ³ /año | 73,697,800 | 10,435,300 | 9,808,700 | 8,965,200 |
| Recarga anual total m ³ /año | 102,907,000 | | | |
| Recarga anual neta en el área de estudio en MMCA | 102.907 | | | |

Figura 54. Tabla de datos de recarga total en las estaciones del área noreste del acuífero Las Sierras.

Fuente: Martínez & Chevez, (2017).

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.

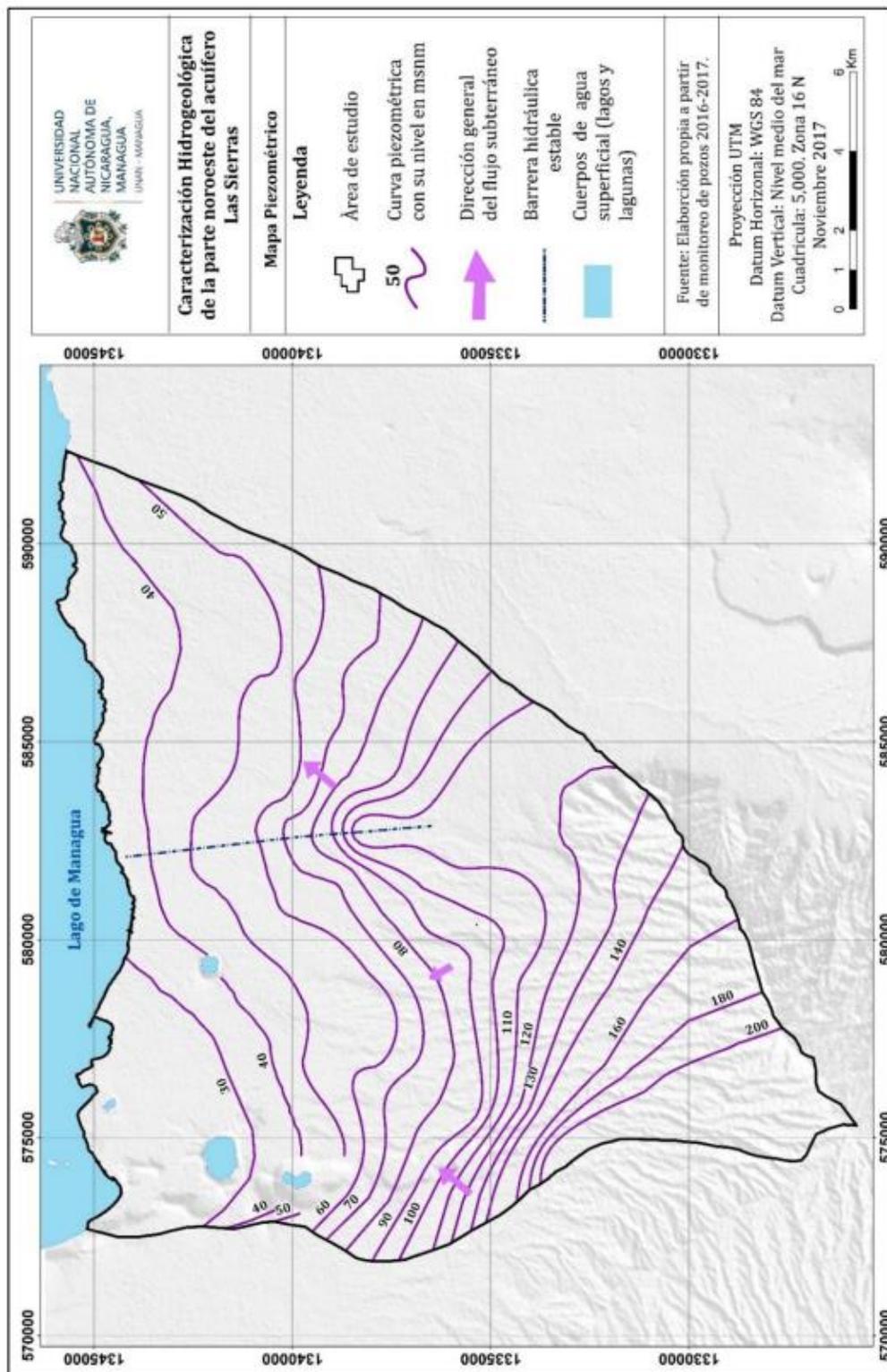


Figura 55. Mapa piezométrico de la parte oeste del acuífero Las Sierras

Fuente: Martínez & Chevez, (2017).

Inventario de pozos de Managua

Tabla 21. Inventario de pozos para el área de Managua

| No | Coordenadas UTM WGS84 | | Nombre | Municipio | Elevación (msnm) | NEAS (msnm) |
|----|--------------------------|---------|-----------------------------|------------|------------------|----------------|
| | E | N | | | | |
| 1 | 582724 | 1338232 | 18 de Mayo | Managua | 204 | 86.32 |
| 2 | 587299 | 1340201 | Sabana Grande #2 | Managua | 114 | 61.66 |
| 3 | 587900 | 1340080 | Sabana Grande #3 | Managua | 108 | 58.61 |
| 4 | 587500 | 1339770 | altamira #5 | Managua | 150 | 67.68 |
| 5 | 582140 | 1339940 | Hospital Manolo Morales | Managua | 126 | 64.72 |
| 6 | 580787 | 1337188 | Villa Panama | Managua | 248 | 82.76 |
| 7 | 587900 | 1333181 | Veracruz #6 | Ticuantepe | 178.1 | 0 |
| 8 | 576010 | 1337190 | Sierra Maestra | Managua | 260 | 61.83 |
| 9 | 581830 | 1338230 | km.7.50 C. Masaya | Managua | 190 | 103.54 |
| 10 | 577300 | 1340900 | René Cisnero | Managua | 288 | 54.6 |
| 11 | 580400 | 1335250 | San Isidro de la Cruz Verde | Managua | 303 | 90.2 |
| 12 | 583204 | 1340478 | Nicarao #3 | Managua | 214.6 | 148 |
| 13 | 572290 | 1323600 | Los Alpes #1 | Managua | 385 | 76.46 |
| 14 | 581380 | 1338870 | Centro America #4 | Managua | 178 | 86.54 |
| 15 | 582027 | 1334259 | La Hoyada | Managua | 360 | 113.84 |
| 16 | 582986 | 1333543 | San Antonio Sur | Managua | 320 | 120.37 |
| 17 | 579485 | 1333110 | Alpes #4 | Managua | 540 | 124.15 |
| 18 | 579362 | 1334997 | Los Alpes #5 | Managua | 370 | 95.61 |
| 19 | 581215 | 1333825 | Bosques de San Isidro | Managua | 392 | 127.98 |
| 20 | 587600 | 1332150 | Managua I E-2 | Managua | 217 | 108.57 |
| 21 | 587360 | 1331780 | Pozo E-3 Managua I | Ticuantepe | 218 | 103.95 |
| 22 | 587450 | 1331600 | E-5 Managua I | Ticuantepe | 218 | 97.76 |
| 23 | 587400 | 1331500 | Managua I E-6 | Ticuantepe | 219 | 106.96 |
| 24 | 587550 | 1331550 | E-I Managua I | Ticuantepe | 224 | 103.9 |
| 25 | 579147 | 1334686 | Las Viudas | Managua | 415 | 105.27 |
| 26 | 578018 | 1338260 | Memorial Sandino | Managua | 220 | 45.17 |
| 27 | 590130 | 1339510 | p-1 Managua II | Managua | 78.05 | 55.32 |
| 28 | 589880 | 1338920 | p-2 Managua II | Managua | 81.92 | 26.62 |
| 29 | 592142 | 1337092 | p-7 Managua II | Managua | 94.15 | 42.42 |

| | | | | | | |
|----|--------|---------|-------------------------------|---------------|--------|--------|
| 30 | 591630 | 1336800 | p-8 Managua II | Managua | 103.87 | 58.15 |
| 31 | 591140 | 1335980 | p-11 Managua II | Managua | 130 | 50.76 |
| 32 | 591500 | 1338600 | p-12 Managua II | Managua | 87.02 | 54.31 |
| 33 | 592800 | 1337050 | p-15 Managua II | Managua | 97.4 | 57 |
| 34 | 590080 | 1341400 | Las Mercedes #18 | Managua | 69 | 55.28 |
| 35 | 592787 | 1341744 | CNIA-INTA | Sabana Grande | 67 | 57.85 |
| 36 | 596046 | 1328656 | El Gavilan | Nindiri | 218 | 127.15 |
| 37 | 576988 | 1393300 | Iglesia San Judas | Managua | 183 | 0 |
| 38 | 597300 | 1325650 | Jardin de la barranca | Masaya | 240 | 144.6 |
| 39 | 584653 | 1331393 | Pozo San Martin | Managua | 278 | 147.51 |
| 40 | 586565 | 1338217 | San Sebastian de laS Jaguitas | Managua | 161 | 73.96 |
| 41 | 584653 | 1331393 | Ticuante | Managua | 278 | 147.51 |
| 42 | 587350 | 1332000 | Managua I W-1 | Ticuantepe | 215 | 109.88 |
| 43 | 587250 | 1331800 | W-2 Managua I | Ticuantepe | 218 | 107.94 |
| 44 | 587400 | 1332000 | Managua I W-3 | Ticuantepe | 218 | 108.9 |
| 45 | 587300 | 1331500 | W-4 Managua I | Ticuantepe | 219 | 102.99 |
| 46 | 587400 | 1331600 | Managua I W-5 | Ticuantepe | 220 | 108.92 |
| 47 | 587300 | 1331300 | Managua I W-6 | Ticuantepe | 220 | 107.1 |
| 48 | 587320 | 1331440 | Managua I W-7 | Ticuantepe | 221 | 107.21 |
| 49 | 587190 | 1331430 | Managua I W-8 | Ticuantepe | 225 | 110.61 |
| 50 | 580501 | 1339994 | Altamira #5-pozo sustituto | Managua | 150 | 67.68 |
| 51 | 583191 | 1339938 | Colonia 14 de septiembre | Managua | 144 | 18 |
| 52 | 576402 | 1340478 | Hospital Bertha Calderón | Managua | 152 | 43 |
| 53 | 587969 | 1333485 | Veracruz #6-sustituto | Ticuantepe | 178 | 0 |
| 54 | 581867 | 1338422 | Km 7.5 c.Masaya(p.sustituto) | Ticuantepe | 190 | 82 |
| 55 | 580400 | 1335250 | San Isidro (pozo sustituto) | Managua | 340 | 111.13 |
| 56 | 579727 | 1335113 | Alpes 2 | Managua | 400 | 92.2 |
| 57 | 581414 | 1339081 | centro A. #4 Pozo sustituto | Managua | 165 | 95.83 |
| 58 | 587300 | 1331500 | Pozo sustituto Managua I | Managua | 219 | 120 |
| 59 | 590500 | 1335350 | p-10 Managua II | Managua | 140 | 50.76 |
| 60 | 591140 | 1335980 | p-11 Managua 2 | Managua | 130 | 50.76 |
| 61 | 591492 | 1338735 | p-12 Managua 2 | Managua | 87.02 | 32.31 |

A continuacion en las siguientes páginas, se presentan las descripciones con las especificaciones de profundidad de los pozos representados en los perfiles hidrogeológicos.

DESCRIPCIÓN DE LOS POZOS DEL PERFIL N°1
SECCIÓN A - A'

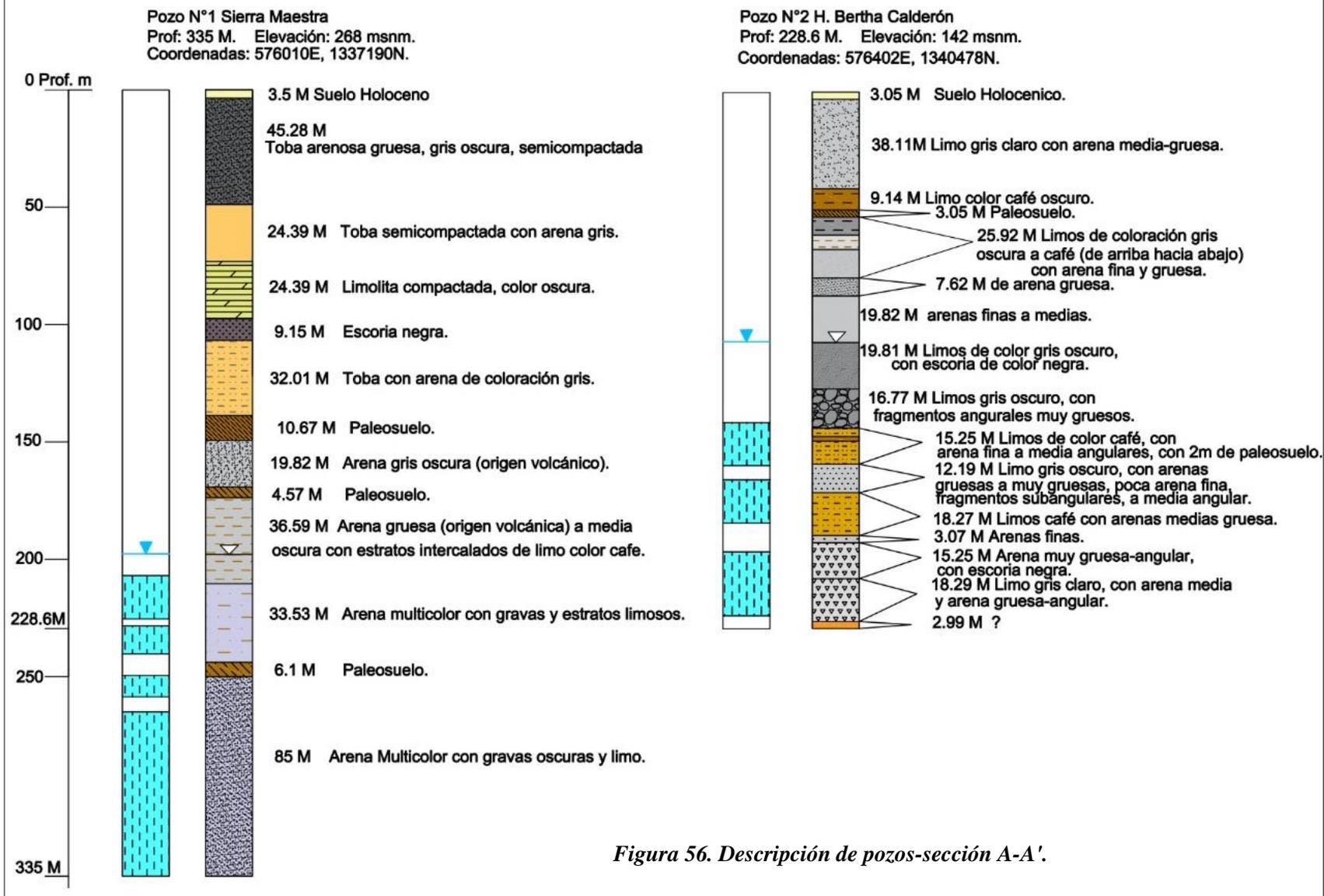


Figura 56. Descripción de pozos-sección A-A'.

**DESCRIPCIÓN DE POZOS DEL PERFIL N°2.
SECCIÓN B - B'**

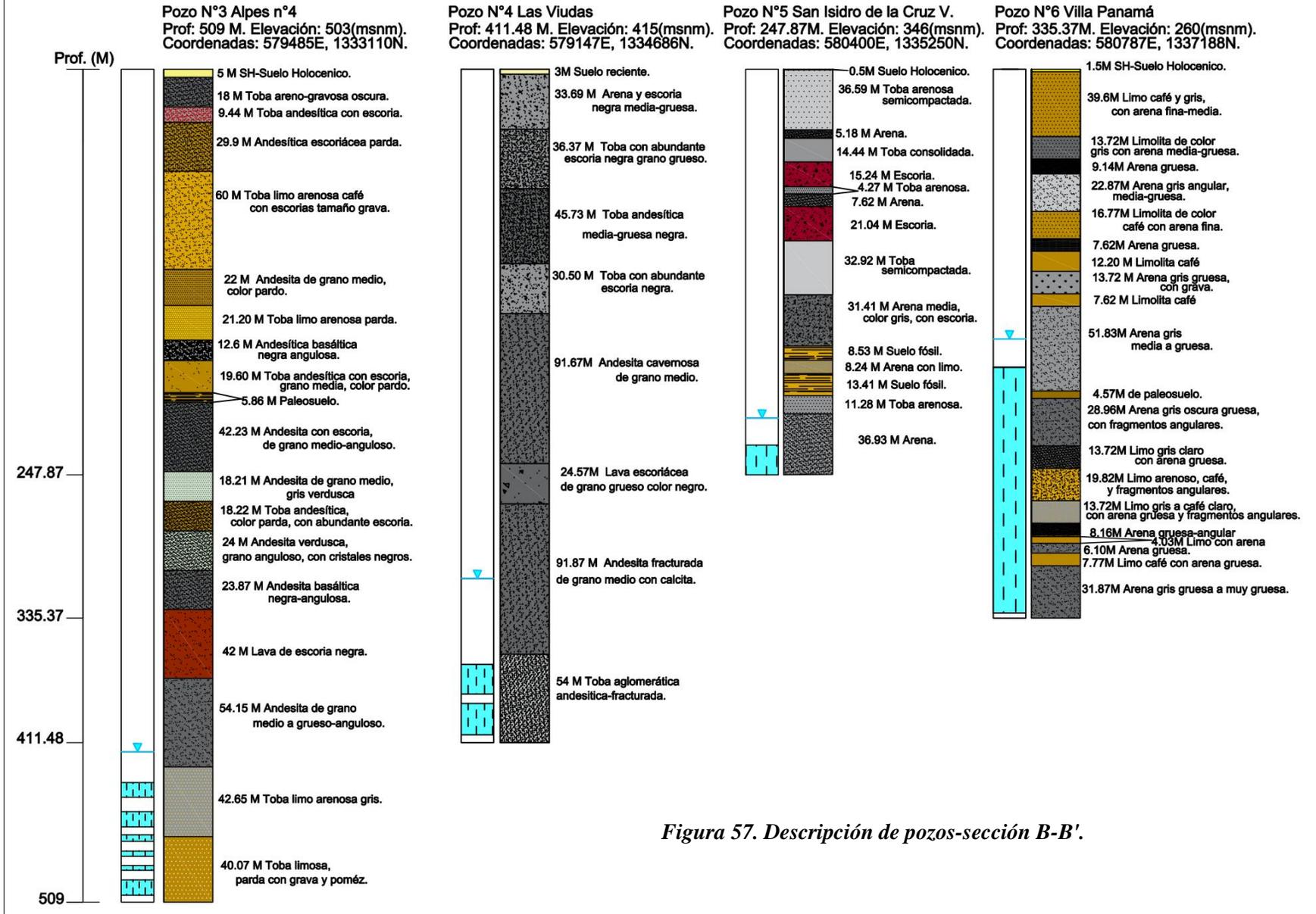


Figura 57. Descripción de pozos-sección B-B'.

DESCRIPCIÓN DE POZOS DEL PERFIL N°2. SECCIÓN B - B'

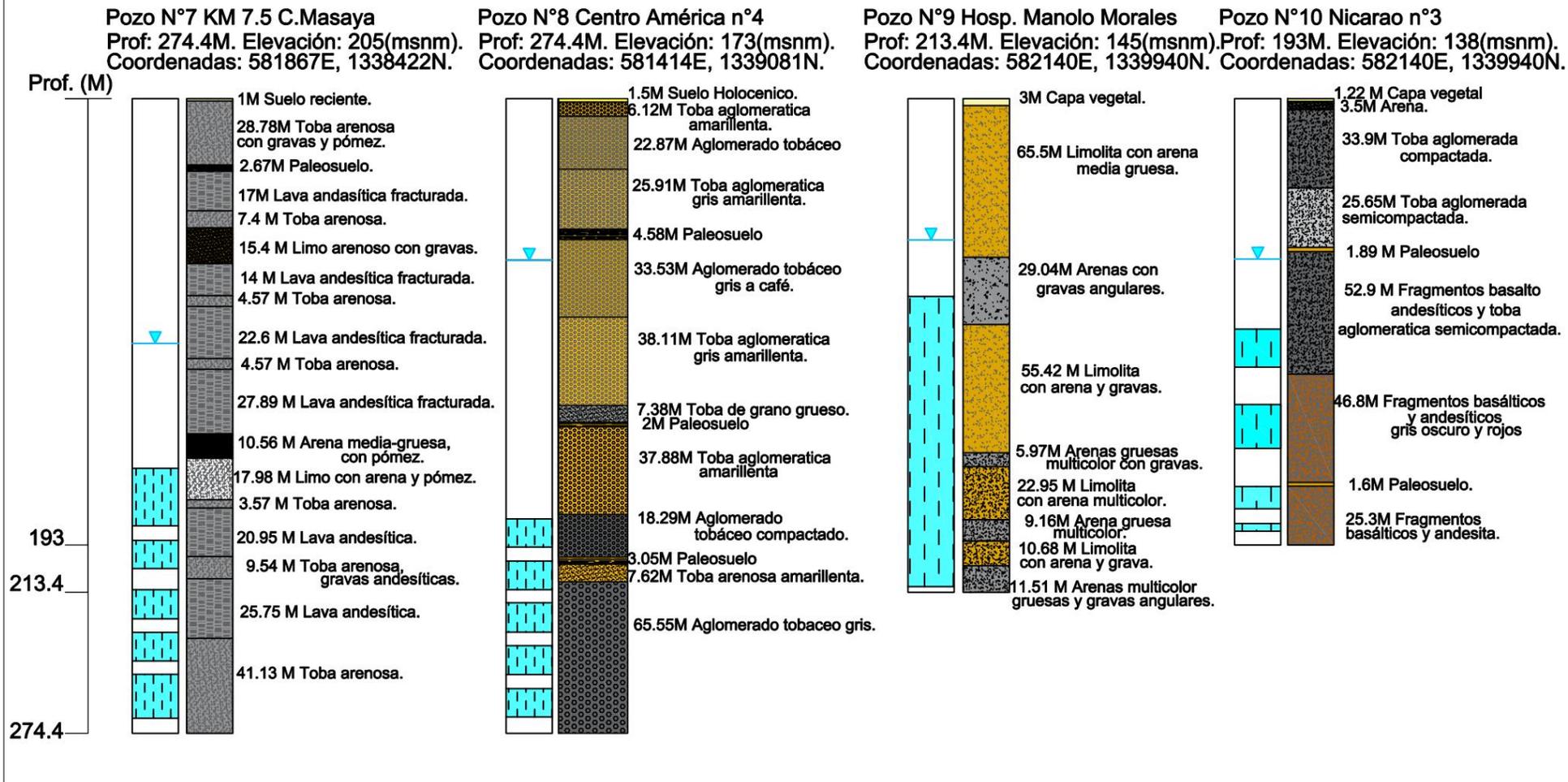


Figura 58. Descripción de pozos-sección B-B'.

DESCRIPCIÓN DE POZOS DEL PERFIL N°3 SECCIÓN C-C'

Pozo N°11 Bosque de San Isidro.
Prof: 381M. Elevación: 403(msnm).
Coordenadas: 581215E, 1333825N.

Pozo N°12 San Isidro de la Cruz V.
Prof: 247.87M. Elevación: 346(msnm).
Coordenadas: 580400E, 1335250N.

Pozo N°13 Alpes n°2
Prof: 384M. Elevación: 400(msnm).
Coordenadas: 579727E, 1335113N.

Pozo N°14 Memorial Sandino
Prof: 274.4M. Elevación: 238(msnm).
Coordenadas: 578018E, 1330260N.

Pozo N°15 H. Bertha Calderón
Prof: 228.6 M. Elevación: 142 msnm.
Coordenadas: 576402E, 1340478N.

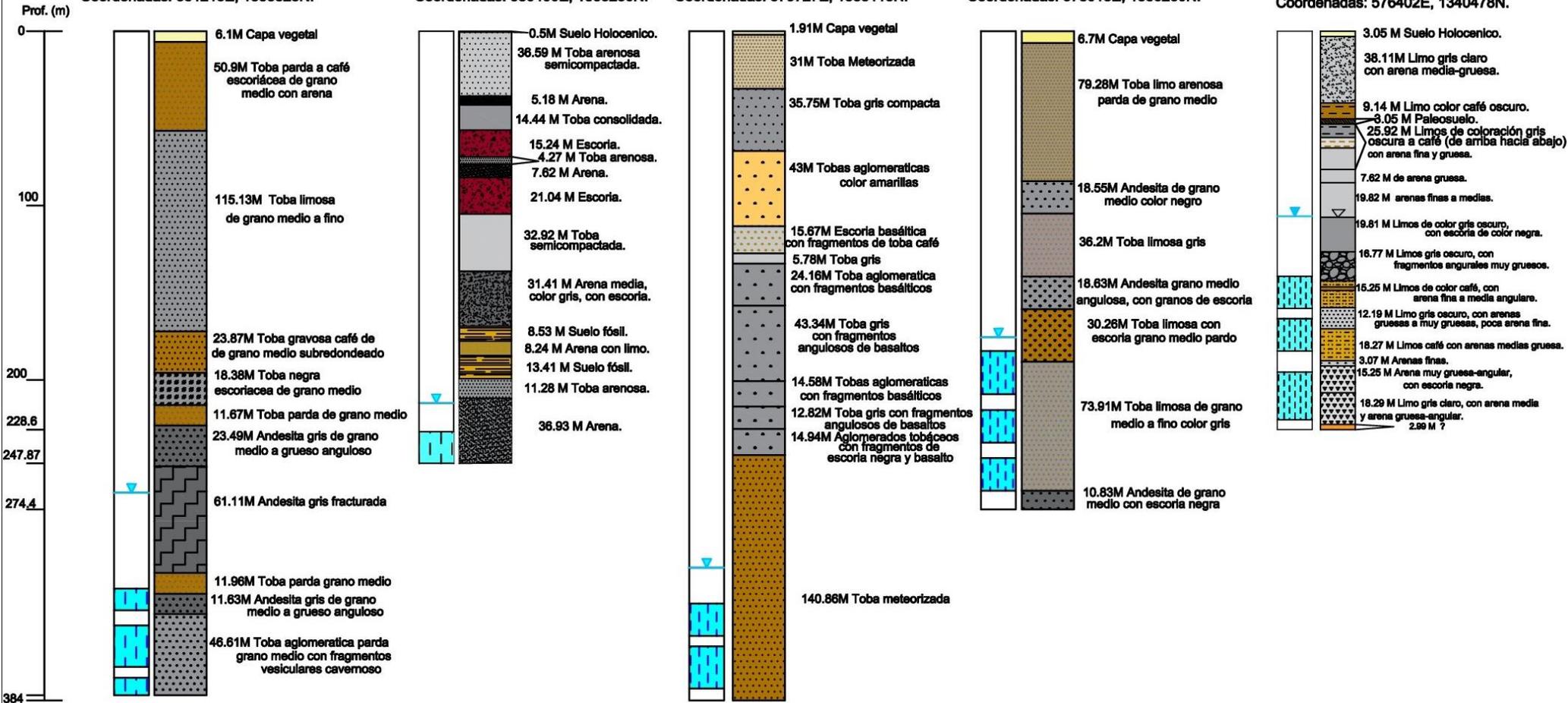


Figura 59. Descripción de pozos-sección C-C'.

DESCRIPCIÓN DE POZOS DEL PERFIL N°4 SECCIÓN D-D'

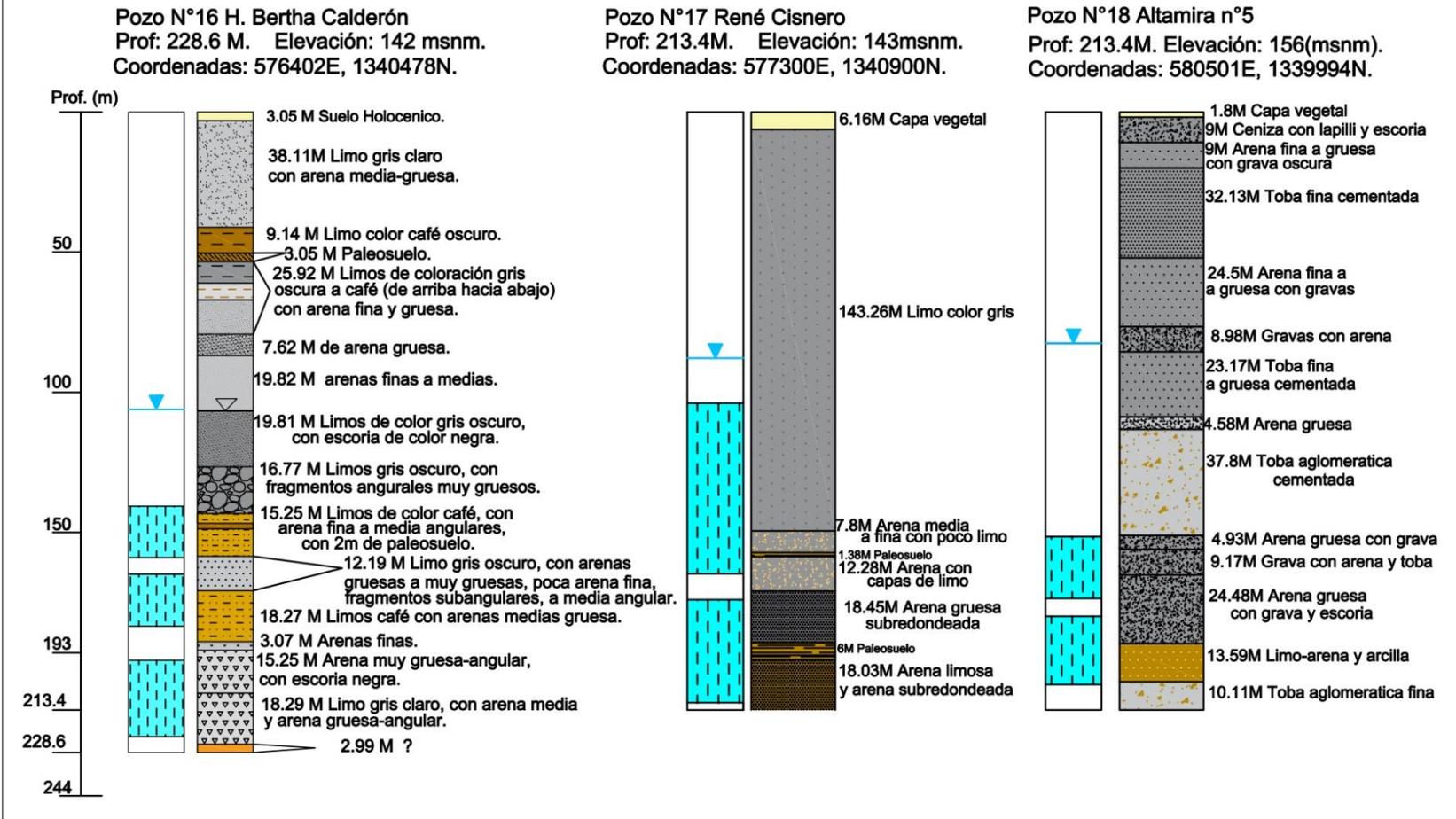


Figura 60. Descripción de pozos-sección D-D'

DESCRIPCIÓN DE POZOS DEL PERFIL N°4 SECCIÓN D-D'

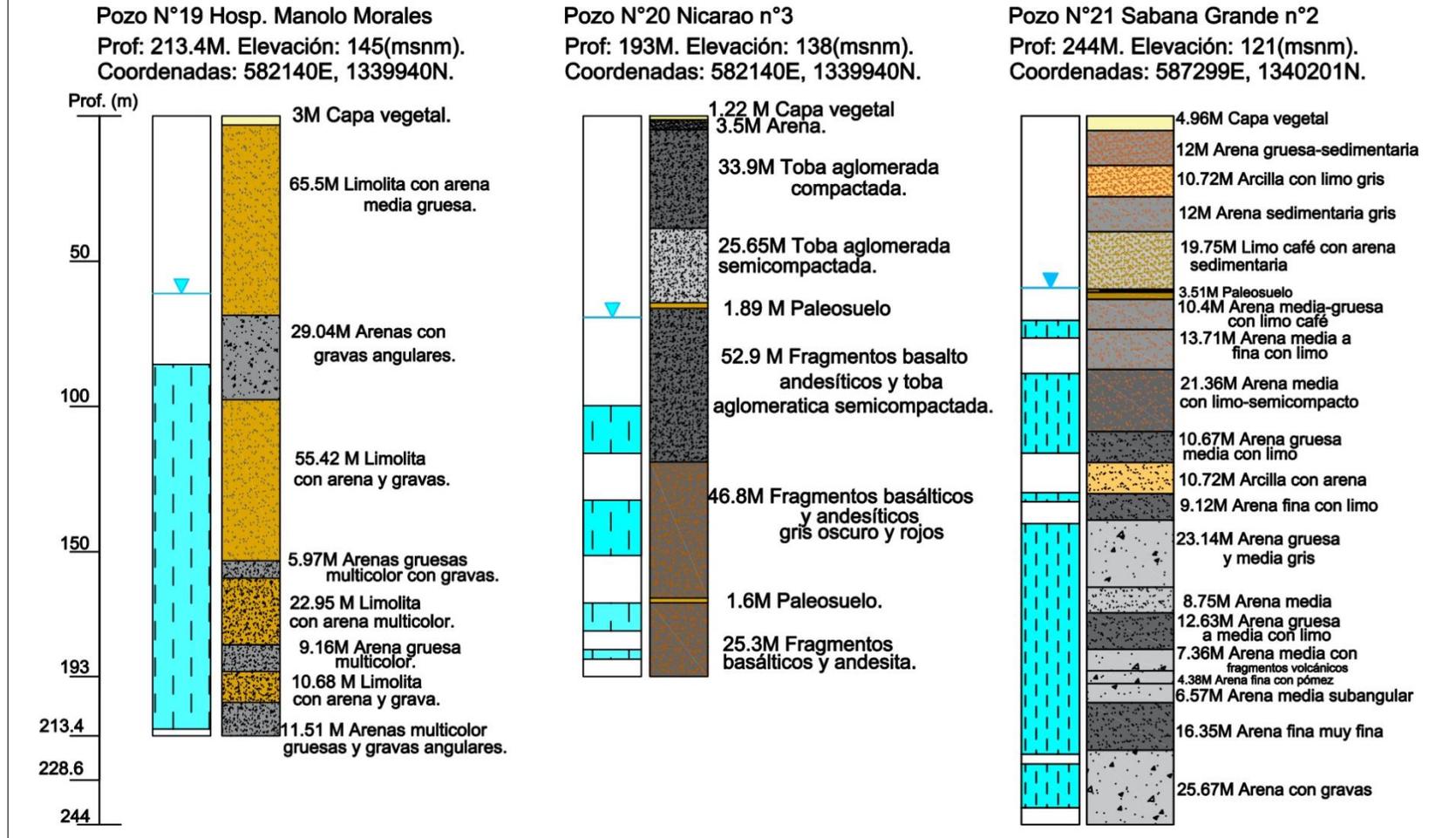


Figura 61. Descripción de pozos-sección D-D'.

**DESCRIPCIÓN DE POZOS DEL PERFIL N°5
SECCIÓN E-E'**

Pozo N°22 Bosque de San Isidro.
Prof: 381M. Elevación: 403(msnm).
Coordenadas: 581215E, 1333825N.

Pozo N°23 La Hoyada
Prof: 365M. Elevación: 370(msnm).
Coordenadas: 582027E, 1334259N.

Pozo N°24 Villa Panamá
Prof: 335.37M. Elevación: 260(msnm).
Coordenadas: 580787E, 1337188N.

Pozo N°25 KM 7.5 C.Masaya
Prof: 274.4M. Elevación: 205(msnm).
Coordenadas: 581867E, 1338422N.

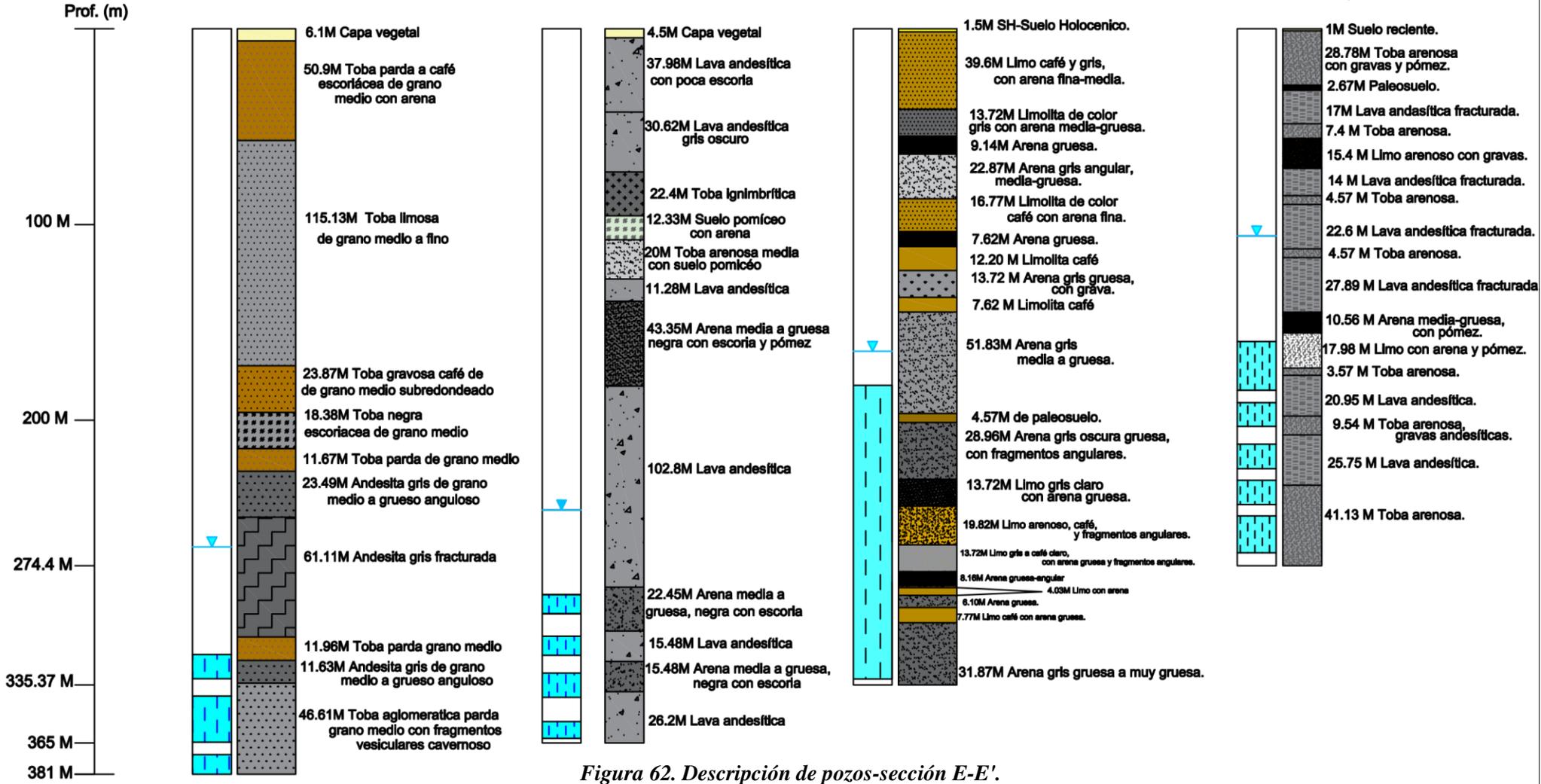


Figura 62. Descripción de pozos-sección E-E'.

**DESCRIPCIÓN DE POZOS DEL PERFIL N°5
SECCIÓN E-E'**

Pozo N°26 18 de Mayo
Prof: 243.84M. Elevación: 205(msnm).
Coordenadas: 582724E, 1338232N.

Pozo N°27 Hosp. Manolo Morales
Prof: 213.4M. Elevación: 145(msnm).
Coordenadas: 582140E, 1339940N.

Pozo N°28 Colonia 14 de Septiembre
Prof: 189M. Elevación: 155(msnm).
Coordenadas: 583191E, 1339938N.

Pozo N°29 Nicarao n°3
Prof: 193M. Elevación: 138(msnm).
Coordenadas: 582140E, 1339940N.

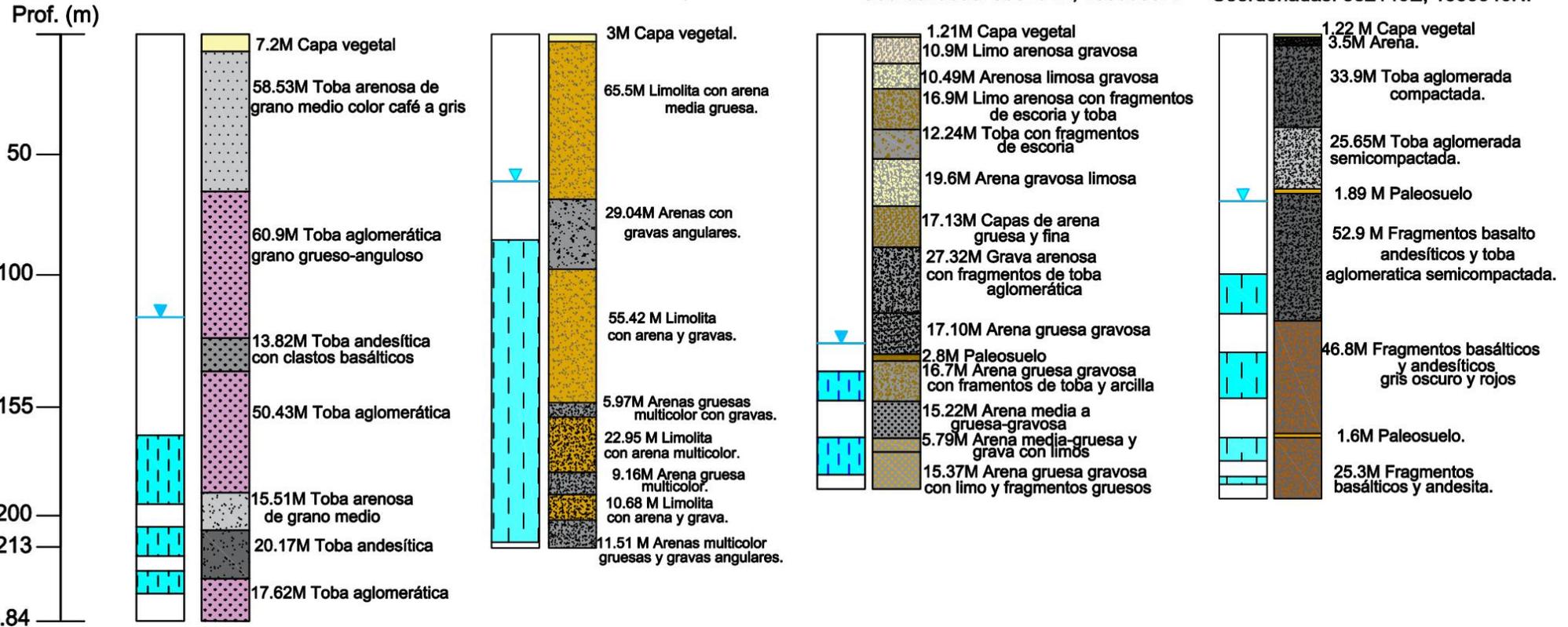


Figura 63. Descripción de pozos-sección-E-E'

Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua.