



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

Facultad de Ciencias e Ingeniería

**Departamento de Tecnología
Ingeniería Geológica**

**Departamento de Física
Física con Mención en Geofísica**

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Tesis Monográfica presentada como requisito para optar al título de:

Ingeniero Geólogo
y
Licenciado en Física con mención en geofísica

Presentado por:

- Br. Juan Bautista Reyna Martínez
- Br. Karina del Socorro Quiroz González

Tutor: PhD. Heyddy Calderón Palma.

Asesor: Dr. Marcel Chow.

Asesor Metodológico: MSc. Karen Acevedo Mena

Managua, miércoles, 16 de diciembre de 2020

DEDICATORIA

*A Dios, nuestra familia, amigos y conocidos,
a todos aquellos que han aprendido a vivir,
y a los que a pesar de las ganas de hacerlo no pudieron.*

Agradecimientos

Agradecido inmensamente con Dios por haber puesto las mejores bendiciones en mi camino, con nuestra Tutora, Doctora Heyddy Calderón por poner su total confianza en mis habilidades y por revisar con ojo crítico el documento de tesis en cada etapa; a nuestro asesor, el Doctor Marcel Chow por atender el proceso de este trabajo, tanto en la etapa de revisión como en la de campo.

Me gustaría agradecer particularmente la asistencia ofrecida por el Instituto de Geología y Geofísica de la UNAN Managua (IGG-CIGEO/UNAN-Managua) y a sus directivos por poner a disposición todos sus equipos para con sus estudiantes, así como el apoyo técnico calificado en campo de sus trabajadores; al Doctor Carlos Rubí por la asistencia del trabajo Geológico de campo y por la etapa de revisiones; al Doctor Denis Avellán por sus consejos en la parte estratigráfica; al personal administrativo, de investigación y de limpieza por sus buenos consejos y enseñanzas en el tiempo que estuve en el Instituto. También, estoy eternamente agradecido con cada uno de los excelentes maestros que vieron crecer mi vocación, que acompañaron el proceso de aprendizaje con observación y prudencia, Francisco, Gema, Xóchilt, Angélica, Edmundo, Gustavo, Armando y a los docentes de las demás áreas.

A mi Familia, mis dos madres Gregoria y Luz y a mis dos padres Roberto y Crescencio quienes con amor me ofrecieron las mejores herramientas para enfrentar la vida, a mis hermanos por el inmenso apoyo, Hazel, Luisa, David, Francisco y Moisés. A todos mis amigos por permitirme caminar a su lado, en especial a Cassie, Amanda, Lía, Iris, Arlen, Regina, Ariel, Keila, David y a todos mis compañeros de clases, los amo a todos. En particular agradezco a mi compañera de tesis, quien desempeñó un papel muy importante y que sin su labor preciosa este trabajo no se hubiera consumado y por ser una gran amiga.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Especialmente me complace agradecer a la Alcaldía de Managua por impulsar proyectos de carácter social que benefician a tantas personas y por impulsar acuerdos institucionales con el IGG como el enmarcado en esta tesis monográfica; a la Dirección de Hidrología de ENACAL por su apoyo con material que se utilizó para los análisis del mismo y por el acompañamiento en campo.

Gracias, sin su apoyo este trabajo no se hubiera realizado.

Juan Bautista Reyna Martínez

Primeramente, le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad. Quiero agradecer a mi tutora PhD. Heyddy Calderón y a mi asesor DSc. Marcel Chow, quien con sus conocimientos y apoyo me guiaron a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer al Instituto de Geología y Geofísica de la UNAN Managua (IGG-CIGEO), por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda. Le doy gracias a mis padres Octavio Y Francisca por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo, por ser un excelente ejemplo de vida a seguir, a mis abuelos, tíos y primos por su cariño. A mis hermanos Francisco, Enrique y Eliezer por ser parte importante de mi vida, por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado. A Raúl, por ser una parte muy importante de mi vida y por todo su apoyo. A los excelentes maestros que me han formado a lo largo de la carrera. A todas las personas que laboran en el IGG-CIGEO por su apoyo, amistad y cariño durante mi estadía en el instituto.

A mis amigos, Ninoska, Darling, Humberto, Erick, David, Keyla, Enozka, Carolina, Andrés, Álvaro, Elieth, Ramón, Lineth, que siempre me han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y esta profesión. A Amalia por su cercanía y apoyo incondicional durante mi carrera, a Delia y Daniela por su amistad y servicio. A las señoras Irma, Idalia, Isabel, Esperanza, y Aurora que me acogieron en su hogar y sobre todo por hacer de su familia, una familia para mí. A Juan por haber sido un excelente compañero de tesis y amigo, por haberme tenido la paciencia necesaria y por motivarme a seguir adelante. Gracias a todos.

Karina del Socorro Quiroz González

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA



IGG-CIGEO
INSTITUTO DE
GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA
UNAN-MANAGUA

2020: "AÑO DE LA EDUCACIÓN CON CALIDAD Y PERTINENCIA"

Managua, 19 de noviembre de 2020

MSc. Elim Campos Pérez
Director del Departamento de Tecnología
Facultad de Ciencias e Ingeniería
UNAN-Managua
Su despacho

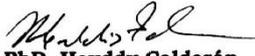
Estimado Maestro Campos,

Reciba cordial saludo de mi parte, el motivo de la presente es para constar que he guiado, orientado y revisado el trabajo de culminación de estudios de grado de los bachilleres: Juan Bautista Reyna Martínez y Karina del Socorro Quiróz Gonzales, el cual lleva por título: "Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua".

No omito manifestar que he seguido el proceso de elaboración del documento y considero que cumple con los requisitos establecidos por la Universidad. Por lo tanto, solicito realizar trámites requeridos para el proceso de defensa y titulación.

Sin más a que referirme, le saludo cordialmente.

Atentamente,


PhD. Heyddy Calderón
Directora
IGG-CIGEO/UNAN-Managua.



Cc. Archivo.

¡A la libertad por la Universalidad!
<https://igg.unan.edu.ni> | +505 2277 0621 | +505 2270 3983 | Apartado postal: A-1311 | recepcion@igg.unan.edu.ni
Rotonda Universitaria Rigoberto López Pérez, 200 mts al Este. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua

Handwritten note:
Anexo Memo
20-11-20
1430

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA



IGG-CIGEO
INSTITUTO DE
GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA
UNAN-MANAGUA

2020: "AÑO DE LA EDUCACIÓN CON CALIDAD Y PERTINENCIA"

Managua, 19 de noviembre de 2020

Dr. Noel Zelaya
Director del Departamento de Física
Facultad de Ciencias e Ingeniería
UNAN-Managua
Su despacho

Estimado Doctor Zelaya,

Reciba cordial saludo de mi parte, el motivo de la presente es para constar que he guiado, orientado y revisado el trabajo de culminación de estudios de grado de los bachilleres: Juan Bautista Reyna Martínez y Karina del Socorro Quiróz Gonzales, el cual lleva por título: "Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua".

No omito manifestar que he seguido el proceso de elaboración del documento y considero que cumple con los requisitos establecidos por la Universidad. Por lo tanto, solicito realizar trámites requeridos para el proceso de defensa y titulación.

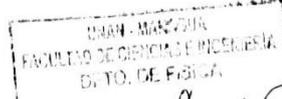
Sin más a que referirme, le saludo cordialmente.

Atentamente,


Ph.D. Heyddy Calderón
Directora
IGG-CIGEO/UNAN-Managua.



Cc. Archivo.



¡A la libertad por la Universidad!
<https://igg.unan.edu.ni> | +505 2277 0621 | +505 2270 3983 | Apartado postal: A-131 | reccion@igg.unan.edu.ni
Rotonda Universitaria Rigoberto López Pérez, 200 mts al Este, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua

20.11.20

RESUMEN

Las características hidrogeológicas como la superficie y el movimiento del agua subterránea, características mineralógicas están controladas por las particularidades lito-estratigráficas al Oeste de la ciudad Managua. En este trabajo se analizaron estas características por medio de métodos directos e indirectos: Tomografías eléctricas, análisis de campo en pozos en las cercanías, pruebas de infiltración, revisión de las características geológicas superficiales y en profundidad de la zona y la perforación de un pozo exploratorio, además del análisis de resultados de pruebas de bombeo y pruebas físico-químicas.

A partir de levantamiento geológico, tomografías eléctricas, registro eléctrico de pozos y correlaciones estratigráficas se comprobó que existen dos formaciones litológicas principales, Grupo Volcánico Masaya y La Formación Las Sierras Medio, separadas por Suelos Fósiles. A partir de datos del inventario de pozos se determinó que la dirección principal de flujo es de Sur a Norte. Los niveles de los pozos someros ubicados en las cercanías de la costa del Lago de Managua mostraron una respuesta más rápida a eventos de precipitación, que los pozos en el sur del área de estudio, y que los pozos profundos. También se identificaron diferencias entre los valores de conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y temperatura del agua en pozos someros y en pozos profundos. Estos elementos son indicios de la ocurrencia de un sistema de flujo local somero, alimentado por recarga local; y otro sistema más profundo probablemente alimentado por recarga regional. La calidad del agua en los pozos perforados del área indica dureza y tendencia a ser incrustantes. En cuanto a la calidad para consumo humano, en la muestra analizada no se encontraron anomalías relevantes.

Asimismo, fue realizado un balance hídrico subterráneo con el fin de determinar el rendimiento sostenible, el que estima que el bombeo proyectado no afectaría las reservas subterráneas. Todos los resultados anteriormente expuestos, fueron sintetizados en un modelo conceptual, el que vincula las propiedades hidrogeológicas, hidráulicas, direcciones de flujo, recarga regional-local y descargas al Lago.

Palabras clave: *Hidrogeología; Geofísica; Calidad de Agua Subterránea; Acuífero Las Sierras; Rendimiento Sostenible.*

ABSTRACT

The hydrogeological characteristics such as the surface and the movement of the groundwater, mineralogical characteristics are controlled by the litho-stratigraphic peculiarities to the West of the city of Managua. In this work these characteristics were analyzed by direct and indirect methods: electrical tomography, field analysis in nearby wells, infiltration tests, review of the surface and depth geological characteristics of the area and the drilling of an exploratory well, in addition to the analysis of pumping test results and physicochemical tests.

From geological survey, electrical tomography, well log and stratigraphic correlations, it was found that there are two main lithological formations, Grupo Volcánico Masaya and La Formation Las Sierras Medio, separated by Fossil Soils. From well inventory data, it was determined that the main flow direction is from South to North. The levels of the shallow wells located near the shore of Lake Managua showed a faster response to precipitation events than the wells in the south of the study area, and the deep wells. Differences were also identified between the values of electrical conductivity, total dissolved solids and water temperature in shallow wells and in deep wells. These elements are indications of the occurrence of a shallow local flow system, fed by local recharge; and a deeper system probably powered by regional recharge. The quality of water in wells drilled in the area indicates hardness and a tendency to be corrosive. Regarding the quality for human consumption, no relevant anomalies were found in the analyzed sample.

Likewise, an underground water balance was carried out in order to determine the sustainable yield, which estimates that the projected pumping would not affect the underground reserves. All the previously exposed results were synthesized in a conceptual model, which links the hydrogeological and hydraulic properties, flow directions, regional-local recharge and discharges to the Lake.

Keywords: Hydrogeology; Geophysics; Groundwater Quality; Las Sierras Aquifer; Sustainable Yield.

CONTENIDO

Capítulo 1 ASPECTOS INTRODUCTORIOS.....	1
1.1 Introducción	1
1.1. Descripción general del área de estudio	3
1.1.1 Vías de Acceso.....	3
1.2 Planteamiento del Problema.....	6
1.3 Justificación	7
1.4 Objetivos	8
1.4.1 General.	8
1.4.2 Específicos.....	8
Capítulo 2 MARCO REFERENCIAL.....	9
2.1.1 Antecedentes.....	9
2.1.2 Marco Teórico.....	12
2.1.2.1 Marco tectónico.....	12
2.1.2.2 Marco Geológico.....	18
2.3 Marco Conceptual.....	23
2.3.1 Conceptos Fundamentales Hidrogeología:	23
2.3.2 Conceptos Fundamentales Geofísicos:.....	31
2.4 HIPÓTESIS.....	39
Capítulo 3 DISEÑO METODOLÓGICO	40
3.1 Tipo de Estudio.....	40
3.2 Área de estudio.....	40
3.3 Universo y Muestra.....	40
3.4 Variables y Operacionalización de variables.....	41
3.5 Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos e información	42
3.6 Procedimientos para la recolección de datos e información	45
3.7 Plan de análisis y procesamiento de datos	50
Capítulo 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	56
Análisis y comprobación de la Geomorfología y Geología local	56
<i>Rasgos geomorfológicos generales</i>	56
<i>Geología general del área</i>	59
<i>Correlación estratigráfica entre los pozos del área de estudio</i>	62
<i>Estratigrafía</i>	65
<i>Análisis de la Geología estructural del área.</i>	70
Propiedades Geofísicas del área de estudio.....	73
<i>Correlación Geología-Geofísica</i>	79
Hidrogeología del área de estudio.....	85
<i>Balance hídrico climático</i>	85
<i>Balance Hídrico de suelos</i>	88
<i>Inventario de Pozos</i>	92
<i>Fluctuaciones de la superficie freática</i>	94
<i>Parámetros hidráulicos del acuífero</i>	97

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

<i>Composición química y Calidad del agua subterránea</i>	<i>100</i>
<i>Balance subterráneo para el tubo de flujo</i>	<i>112</i>
<i>Rendimiento Sostenible y su aprovechamiento.....</i>	<i>114</i>
<i>Modelo hidrogeológico conceptual</i>	<i>116</i>
Capítulo 5 CONCLUSIONES.....	120
5.2. RECOMENDACIONES.....	121
ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Ilustración 1. Mapa de Ubicación</i>	5
Ilustración 2. Mapa de rasgos tectónicos de Centroamérica y el Caribe, mostrando la Trinchera Meso-Americana, el sistema de fracturas Polochic -Motagua, escarpe de Hess, cadena volcánica nicaragüense, bloque Maya, Chortis, Chorotega y las Placas Coco y Caribe. Basado en Frischbutter, (2002) y Weinberg, (1992).....	13
Ilustración 3. Mapa morfológico de la Provincia de la Depresión, con tasa de extensión por: Morgan, (2008) y tectónica por: Frischbutter, (2002).	15
Ilustración 4. Mapa estructural con MDE de fondo, que muestra el Graben de Managua, el sistema de Fallas y de Calderas. Basado en: (Walker, 1984; Sebesta, 1997; Brown et al., 1973; Van Wyk de Vries, 1993; 2005; INETER, 2007; Frischbutter, 2002; Espinoza, 2007; Avellán, 2009).	18
Ilustración 5. Mapa de las Provincias Geológicas de Nicaragua (Hodgson, 2000).	20
Ilustración 6. Tipos de Acuíferos. Fuente: (Singhal, 2010)	24
Ilustración 7. Gradiente Hidráulico. Fuente: (Otálvaro, 1999).....	25
Ilustración 8. Representación del concepto de coeficiente de almacenamiento. Fuente: (Sanchez, s.f.)	28
Ilustración 9. (a:) El mapa de isopiezas, (b): puede representar la superficie freática de un acuífero libre o (c) la superficie de una superficie piezométrica de un acuífero confinado. Fuente: (Sanchez, s.f.).....	29
Ilustración 10. Pozo excavado (Izq.) y Sondeo o Pozo Perforado (Dere.) Fuente: Elaboración Propia	29
Ilustración 11. Modelo Simplificado: el acuífero libre entrega agua vaciando sus poros. Fuente: Sanchez,(s.f.)	30
<i>Ilustración 12. Diferencia de potencial. Fuente: Díaz Anaya, (2010)</i>	34
Ilustración 13. Esquema de un registro geofísico de pozo. Fuente: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Tema%2012%20Exploracion%20y%20prospeccion.pdf	36
Ilustración 14. A) Diagrama de registro de Resistividad y potencial Espontáneo, B) Esquema del registro de Temperatura. Fuente: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Tema%2012%20Exploracion%20y%20prospeccion.pdf	38
Ilustración 15. Ubicación de los perfiles Geoeléctricos más ubicación del pozo exploratorio.	49
Ilustración 16. Mapa Geomorfológico del área de estudio. Fuente: Jiří Šebesta-INETER, (2006).	58
Ilustración 17 Mapa Geológico.....	61
Ilustración 18. Correlación Estratigráfica entre los Pozos. Fuente: Elaboración propia	64
Ilustración 19. Columna Lito-Estratigráfica del área de estudio. Fuente: Elaboración propia	69
Ilustración 20. Mapa Estructural.	72
Ilustración 21. Secciones 2D de Tomografías eléctricas TE1 y TE2	75
Ilustración 22 Secciones 2D de Tomografías eléctricas TE3 y TE4.	76
<i>Ilustración 23. Imagen tridimensional de resistividad eléctrica en la dirección de los perfiles TE1, TE2, TE3 y TE4</i>	79
Ilustración 24. Representación de la correlación geológica-geofísica.	81
Ilustración 25. Registro geofísico del pozo exploratorio	82
Ilustración 26. A) Representación de las variables climáticas para el área de estudio, B) Temperatura media mensual en °C. Fuente: Elaboración propia con datos mensuales proporcionados por INETER en los años 2007-2018.	86
Ilustración 27. Representación del balance climático para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos mensuales proporcionados por INETER en los años 2007-2018. *Precipit. M: Precipitación Media Mensual en mm; Evap. M.: Evaporación Media Mensual en mm. .	86
Ilustración 28. Comparación entre los métodos para calcular la Evapotranspiración. Fuente: Elaboración propia con datos de evapotranspiración sin corregir de la estación Aeropuerto para los años desde 2007 a 2018.....	89
Ilustración 29. Comportamiento del Nivel Freático y comportamiento de las Precipitaciones entre los meses de mayo y agosto. *Datos de Precipitación Acumulada fueron facilitados por el área de SIG del IGG-CIGEO/UNAN-Managua, de la estación ubicada en el mismo instituto. Fuente: Elaboración propia.	94

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Ilustración 30. Mapa Piezométrico del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	96
Ilustración 31. A) Temperaturas vs profundidades; B) pH vs profundidades; C) CE vs profundidades; D) TDS vs profundidades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos en la confección del inventario de pozos en el mes de mayo.	102
Ilustración 32. Mapa de distribución de parámetros tomados al momento del inventario de pozos. A) Temperatura [°C], B) pH [Adm], C) Conductividad Eléctrica [μ S/cm], D) Sólidos Totales Disueltos [ppm] Fuente: elaboración propia con datos obtenidos en la confección del inventario de pozos en el mes de mayo.	103
Ilustración 33. Recorrido y tiempo de permanencia de una partícula de agua en un acuífero según su evolución química. Fuente: Chevotareb, (1995) citado por Kehew, (2001).....	104
Ilustración 34. Diagrama de Piper para los análisis en los pozos perforados UNA-ENACAL y exploratorio Bismarck M. Fuente: Elaboración propia con datos facilitados por ENACAL	105
Ilustración 35. Representación de los resultados de las pruebas químicas en: A) Diagrama de Schöeller-Berkaloff; B) Diagrama de Salinidad para la clasificación de aguas para riego.	105
Ilustración 36. Perfil Hidrogeológico Generalizado para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia	119
Ilustración 37. Ubicación recomendada del pozo de extracción. Fuente: Elaboración Propia .	150
Ilustración 38. Propuesta de Rejillas. Fuente: Elaboración propia	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Vértices del área de estudio.....	3
Tabla 2.1. Algunos Valores de Conductividad Hidráulica	26
Tabla 2.2. Resistividades de las aguas y rocas	33
Tabla 3.1. Operacionalización de Variables (MOVI)	41
Tabla 3.2. Métodos e Instrumentos.....	42
Tabla 3.3. Características Sonda Nivel Estático.....	43
Tabla 3.4. Características sonda Multiparamétrica.....	43
Tabla 3.5. Características Permeámetro de Guelph.....	44
Tabla 3.6. Características Medidor de Resistividad.....	45
Tabla 3.7. Características Sonda Eléctrica	45
Tabla 3.8. Datos a recolectar en inventario de Pozos	47
Tabla 3.9. Softwares Utilizados.....	55
Tabla 4.1. Descripciones de materiales de barreno de los pozos y su posible indicativo geológico.	65
Tabla 4.2. Tomografías de Resistividad Eléctrica del Área de Estudio	73
Tabla 4.3 Correlación entre resistividad y litología del área de estudio.....	80
Tabla 4.4. Características Climáticas de la estación del Aeropuerto Internacional A. C. S.	87
Tabla 4.5. Parámetros según las características del tipo de suelo del área de estudio para el cálculo del balance hídrico de suelos.	88
Tabla 4.6. Balance Hídrico con la metodología propuesta por Schosinsky, (2006)	91
Tabla 4.7 Inventario de pozos.....	93
Tabla 4.8 Información de pozos del área de estudio	97
Tabla 4.9 Resumen de los Parámetros Hidráulicos estimados para el área de estudio	98
Tabla 4.10 Comparación de parámetros hidráulicos presentados en distintos estudios.....	98
Tabla 4.11 Rangos de valores de Sólidos totales disueltos de CaCO ₃ en aguas subterráneas y su dureza.....	106
Tabla 4.12. Indicaciones para el ISL y ISL mejorado por Carrier.	107
Tabla 4.13. Resultados del índice de Saturación de Langelier.....	108
Tabla 4.14 Comparación de los parámetros Físicoquímicos obtenidos en pozos del área de estudio con valores recomendados y admisibles por la norma CAPRE.	109
Tabla 4.15 Comparación de resultados obtenidos de la prueba de Absorción atómica y Bacteriológicos en pozos del área de estudio con valores recomendados y admisibles por la norma CAPRE.....	110
Tabla 4.16. Presentación de las componentes de la Ley de Darcy	113
Tabla 4.17 Cálculo del caudal de flujo subterráneo.	113
Tabla 4.18. Balance de Aguas Subterráneas	114
Tabla 5.1. Ensayo de Permeabilidad con el Permeámetro de Guelph #1 para el área de estudio.	129
Tabla 5.2. Presentación de la permeabilidad del suelo para el área de estudio para el ensayo #1	130
Tabla 5.3. Ensayo de Permeabilidad con el Permeámetro de Guelph #2 para el área de estudio.	131

Capítulo 1 ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 Introducción

La presente investigación se refiere al estudio y a la evaluación hidrogeológica para el abastecimiento de agua potable en la zona donde se construirá un proyecto de viviendas de interés social. La investigación de esta problemática se realizó por el interés de conocer el potencial, calidad y disponibilidad del recurso para el abastecimiento del proyecto, que está siendo construido por la Alcaldía de Managua. El profundizar en las características hidrogeológicas de la zona, fue también un interés académico, afianzando el conocimiento de la zona para el desarrollo futuro.

El presente trabajo es de perspectiva multi enfoque, usando métodos geológicos, hidrogeológicos y geofísicos, por lo que se abordará desde un aspecto multidisciplinario atendiendo las nuevas transformaciones curriculares de la UNAN-Managua.

En el capítulo 1 se plantea el contexto del área de estudio, se presenta la problemática y su caracterización, así como la justificación y se citan los objetivos de la investigación.

El capítulo 2, contiene los aspectos referenciales del estudio, correspondientes a antecedentes investigativos, modelos teóricos, conceptos, argumentos e ideas que se han desarrollado en relación con el tema. Este sirvió para y describir el estado del arte, así como la presentación de la hipótesis de investigación que sirvió como guía de las variables que se medirían.

La metodología propuesta para este estudio se describe en el capítulo 3, con una serie de actividades de campo, con el objetivo de recolectar información para su posterior análisis y proposición de resultados.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Los resultados de la investigación son presentados en el capítulo 4. Dentro de ellos están la dirección del movimiento del agua subterránea, la extensión del acuífero, sus características hidráulicas y características químicas que determinan la calidad del agua, así como la lito-estratigrafía y fallamientos locales que fijan las condiciones del medio saturado. Todos estos, serán plasmados en un modelo hidrogeológico conceptual integrado.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones técnicas.

La recolección de los datos para cumplir con lo anterior se realizó en distintas áreas temáticas (Hidrogeología, Geología y Geofísica) con el objetivo de afianzar los conocimientos del medio en el área de estudio, así, la hidrogeología estará siendo sustentada con métodos geofísicos y geológicos, perforación de un pozo exploratorio y pruebas de bombeo.

1.1. Descripción general del área de estudio

El área de estudio se ubica en la zona baja de la Microcuenca 3 de la Subcuenca sur del Lago de Managua, donde se proyecta la construcción de un proyecto de viviendas de interés social ejecutado por la Alcaldía de Managua. El sitio se encuentra ubicado 600 metros al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino. El área está dentro en la región del Pacífico nicaragüense, en el departamento de Managua, municipio de Managua, Capital de la República de Nicaragua.

El centro geográfico se encuentra en las coordenadas: UTM $x= 590965$ m, $y= 1344227$ m, su altura sobre el nivel del mar está entre 40 y 60. El área aproximada es de 4.8 km² que equivale al 2 % del área de la Microcuenca 3. Los límites son: al Norte con el Lago Xolotlán, Al Sur: Con la elevación piezométrica superior: 40, (JICA-INAA, 1993), Al Este: con el Cauce el Borbollón y Al Oeste: Con el Cauce Santa Elena. El área se localiza dentro de la hoja topográfica de: Nindirí (2952 – II) a escala 1:50,000, publicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios territoriales (INETER 2014). Todo esto comprendido en las coordenadas de la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Vértices del área de estudio

Vértices	Este (X)	Norte (Y)
1	589694	1343023
2	592365	1343023
3	591831	1345586
4	589497	1345144

Fuente: elaboración propia

1.1.1 Vías de Acceso.

La principal vía de acceso para llegar es la Carretera Norte (NIC-1) que se dirige hacia Tipitapa. Las vías que pasan en las cercanías y que conducen a la zona estudiada están en buen estado, son adoquinadas en su mayoría y algunos caminos alternos de tierra con buenos accesos.

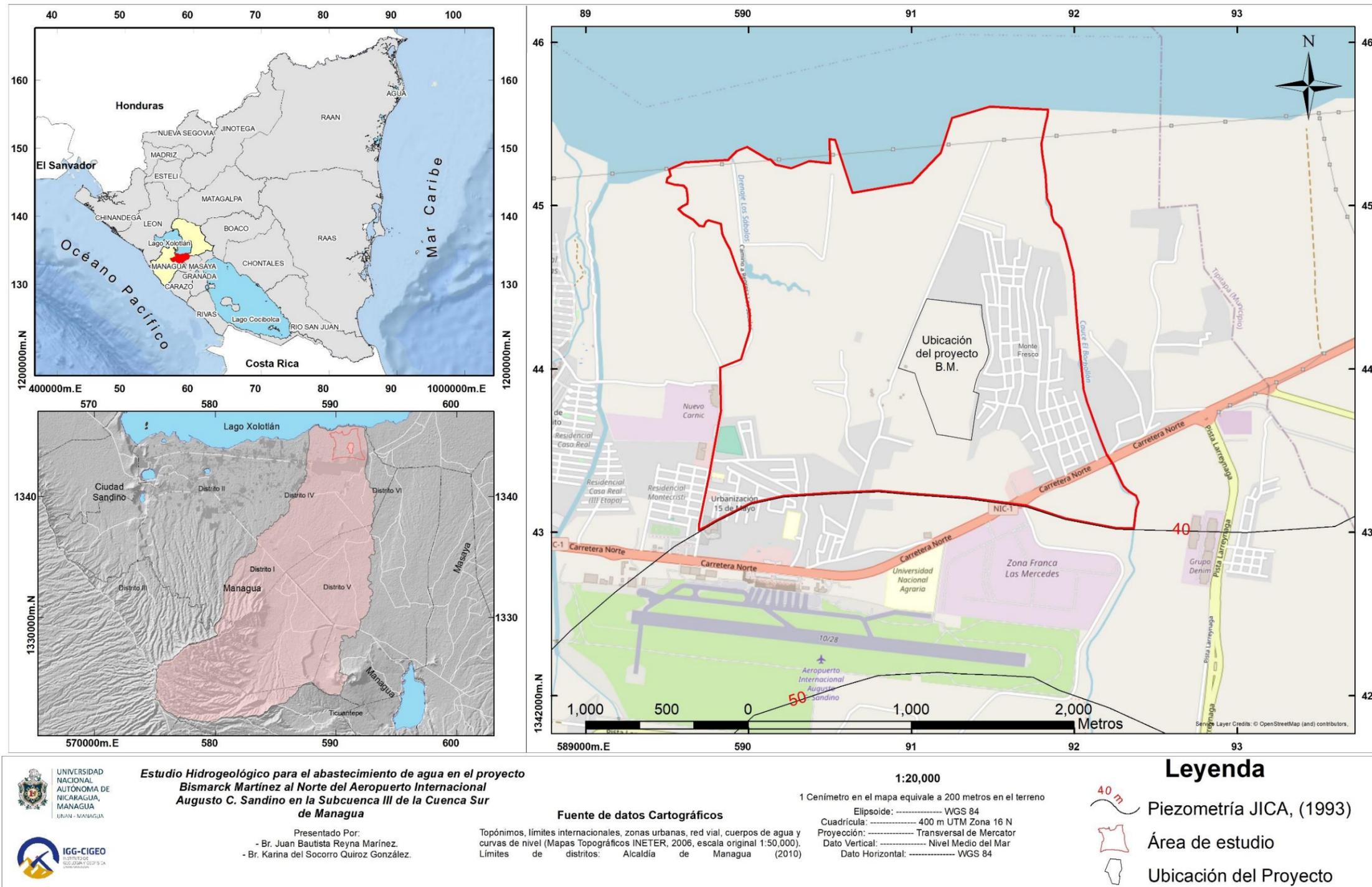


Ilustración 1. Mapa de Ubicación

1.2 Planteamiento del Problema

El acceso al agua en muchos países representa un problema agudo. En los países de Centroamérica a pesar de que la región está generosamente dotada de recursos hídricos, ya que el promedio de agua per cápita disponible en toda la región es de más de 68,000 litros por año, hay altos niveles de escasez y de estrés hídrico (GWP, 2016). Según los datos del Índice de Desarrollo Humano del 2014, la tasa de extracción por país es baja. El uso de agua ha crecido a nivel global a un ritmo elevado a tal punto que en muchas regiones ya no es posible el suministro de un servicio de agua fiable (FAO, 2013).

Nicaragua, un país con unos 129,494 km² de territorio, es el país más grande de Centroamérica, privilegiado también por contar con abundantes reservas hídricas. A pesar de esto, el acceso al agua en Nicaragua ha sido durante años un problema latente, debido, por un lado, a la falta de recursos financieros para utilizar y mantener las fuentes de agua con calidad adecuada para consumo humano, y por otro, a los problemas de gobiernos anteriores para la buena gestión integral del recurso. Su población estimada para el 2017 fue de 6,317,927 habitantes con una densidad poblacional de 1823.3 Hab/Km² (INIDE, 2017). En el año 2000 el 20% de las viviendas no contaban con el suministro de agua por medio de tuberías, para el 2010, el 15% de las viviendas tenían que abastecerse de diferentes alternativas (pozos públicos, pipas, etc.) lo que representa un problema para el desarrollo social (OPS y OMS, 2015).

Del mismo modo, el municipio de Managua es un territorio sometido a un proceso de rápida urbanización y la demanda de agua para uso doméstico se ha incrementado anualmente como resultado del alto crecimiento poblacional. En la zona de estudio se está impulsando la construcción de un proyecto de interés social ejecutado por la Alcaldía de Managua llamado "Bismarck Martínez". La problemática radica en la necesidad de dotar de agua potable a la futura población del reparto (unas 1200 casas).

¿Las condiciones hidrogeológicas y la calidad del agua subterránea son las adecuadas para el abastecimiento del reparto Bismarck Martínez?

1.3 Justificación

La necesidad de agua para el consumo humano está estrechamente relacionada con el crecimiento demográfico, se puede concebir que el desarrollo acrecentado de la población en Managua, al ser la capital y el departamento más poblado del país (INIDE, 2017), es una de las causas que ha generado un aumento en la demanda de agua. A causa de la construcción de un nuevo proyecto de viviendas de interés social llamado Bismarck Martínez, en las cercanías del Aeropuerto Internacional A.C Sandino, la demanda de agua potable será necesaria para el desarrollo.

Además del aumento de la demanda de agua descrita anteriormente, es necesario asegurarse que la calidad del agua para el consumo humano cumpla con las normas establecidas, de esto dependerá que se atienda la necesidad de la población para la obtención de este recurso, el cual aportará al desarrollo social, disminuyendo así los riesgos de enfermedades y mejorando el desarrollo. Para esto resulta de especial interés conocer las propiedades locales del acuífero, así como las características químicas de las aguas subterráneas, para definir las condiciones hidrogeológicas de la zona. La investigación busca beneficiar principalmente al proyecto que tiene la necesidad de agua de buena calidad.

Esta será una investigación con utilidad que contribuirá al enriquecimiento de la disciplina, que en futuras investigaciones podrán afianzar conocimientos del tema, se establece entonces como un aporte a la teoría y a las prácticas educativas. La tesis que se presenta es de carácter multidisciplinario, puesto que se plantea dar solución al problema desde una perspectiva multi enfoque.

Debido a que no se cuenta con suficientes estudios de alcances locales sobre las condiciones hidrogeológicas en la parte baja de la Microcuenca 3 de la Subcuenca Sur de Managua, el presente trabajo es conveniente para afianzar los conocimientos sobre sus características de acuerdo a las necesidades antes descritas. Por otro lado, la investigación contribuye al entendimiento de estas características, para contrastarlas con otros estudios similares y generar una base de datos más detallada en Managua.

1.4 Objetivos

1.4.1 General.

Realizar un estudio hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

1.4.2 Específicos.

- Definir la geometría del acuífero con el fin de delimitar zonas permeables.
- Establecer la dinámica de flujo del agua subterránea en el acuífero para entender su mecanismo de movimiento.
- Evaluar la calidad del agua para consumo humano.
- Determinar los parámetros hidráulicos en el sitio de interés para definir las posibilidades de explotación.
- Delimitar las unidades hidro-estratigráficas mediante métodos directos e indirectos con el fin de crear una modelación espacial.

Capítulo 2 MARCO REFERENCIAL

2.1.1 Antecedentes

Se han realizado diferentes estudios hidrogeológicos – geológicos y geofísicos con el fin de caracterizar acuíferos en Nicaragua. A continuación, se presentan los de mayor relevancia en orden del reciente al más antiguo:

Zambrana (2019). *Peligro Sísmico de la falla geológica Aeropuerto, Margen este de la ciudad de Managua, Nicaragua*. Con el fin de evaluar el riesgo sísmico de la Falla Aeropuerto realizó una investigación para estudio del suelo donde se aplicaron métodos geofísicos de exploración sísmica.

Zambrana (2014). En: *Estimation of shear wave velocity structure using surface waves on the aeropuerto fault, Managua, Nicaragua*, realizó estimación del movimiento del suelo y la microzonificación sísmica, El estudio demostró que la combinación de las diferentes metodologías es una guía eficaz para la estimación de las Velocidades de ondas superficiales donde hay poca información disponible sobre la estructura del suelo subsuperficial.

Zambrana et al. (2012). En: *Fallamiento normal de bloques en el Graben del Aeropuerto, Rift de tipo Pull - Apart Managua, Nicaragua: restricciones de la gravimetría y magnetometría*, evaluó el riesgo de terremotos futuros, usando magnetometría y gravimetría para caracterizar estas estructuras que atraviesan el Graben de Aeropuerto, Estos datos indican la presencia de una serie de fallas normales delimitando bloques levantados y hacia abajo y una falla normal lístrica, Falla Sabana Grande.

Delgado, et al., (2010). En: *Calidad y Disponibilidad de los Recursos Hídricos en tres Microcuencas Costeras del Municipio de Tola, Nicaragua*, hicieron caracterización hidrogeológica, Geológica, Hidrológica y la evaluación de la calidad de los recursos hídricos superficial y subterráneo.

Sequeira y Fuentes (2010) en su informe: *The application of electrical methods in exploration for groundwater resources in the River Malacatoya sub-basin, Nicaragua*, desarrollaron 11 perfiles de Sondeos Eléctricos Verticales Continuos (SEVC) y 9 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), acompañados por una evaluación geológica que en conjunto permitió identificar y caracterizar en profundidad y espacialmente las formaciones acuíferas presentes en tres sub-áreas de la subcuenca del mismo nombre. Esta investigación contiene métodos geofísicos aplicados a búsqueda de agua subterránea, lo que se relaciona a nuestro estudio.

Rivera (2010). Estudió el acuífero de Managua en el trabajo: *Hydrogeological Characterization of the Western Part of Managua, Nicaragua*. Donde analizó las características hidrogeológicas de los acuíferos del Oeste de Managua, concluyendo que la parte Oeste de Managua, es caracterizada por presencia de depósitos volcánicos heterogéneos; La analogía de esta investigación con el presente trabajo es permite relacionar las variables y características físicas del acuífero de Managua.

Simultáneamente Murillo (2010) en su trabajo: *A conceptual model for the groundwater flow pattern and hydraulic properties of aquifers in western Managua, Nicaragua*. Con el objetivo de evaluar las propiedades hidráulicas de los acuíferos, propuso un modelo conceptual hidráulico del acuífero y algunas de las propiedades hidrogeológicas como conductividades hidráulicas bajas, El beneficio de las conclusiones de esta exploración para el presente trabajo radica en ver semejanzas de la metodología y las conclusiones.

Cowan, et al (2002), en su estudio: *Late Holocene Earthquakes on the Aeropuerto Fault, Managua, Nicaragua*, en el que estimó la tasa de deslizamiento vertical en la falla del Aeropuerto de 0.3 a 0.9 mm/año, basado en movimientos verticales de la costa, y la estimación de sus edades en menos de 6.4 m. a. y aproximadamente 2 m. a., respectivamente. Este tipo de investigación ayuda a estudios geológicos locales por su buena información geológica como paleotectónica.

Proyecto SUWaR – ENACAL (2002), en el trabajo: *aplicación del modelo matemático en la Subcuenca de Managua y regulaciones de las actividades económicas para los campos de pozos*, el que tuvo como objetivos el mejorar la comprensión del comportamiento del flujo de agua subterránea, evaluar el rendimiento del acuífero, dimensionar las zonas de protección y elaboración de un plan de protección de las fuentes del suministro de agua, concluyeron que el intenso bombeo en el campo Las Mercedes refleja un posible flujo de entrada del lago de Managua hacia el campo de pozos y que según el mapa de cargas constantes de la Sub-Cuenca Oriental, el mayor peligro de contaminación fueron las actividades agrícolas y ganaderas. Las aseveraciones anteriores ayudan a nuestra investigación en el conocimiento de las características de las direcciones y gradientes del flujo subterráneo y para observar las posibles zonas de contaminación en las cercanías.

JICA & INAA (1993), ejecutaron un *Estudio sobre el proyecto de abastecimiento de agua en Managua*, el que tuvo tres objetivos principales; el calcular el potencial de agua subterránea y formular un plan de desarrollo; elaborar un plan para la expansión y mejora del sistema de abastecimiento de agua, la metodología del estudio se realizó en un periodo de 11 meses, en los que se analizaron sub-componentes como la hidrogeología, meteorología, hidrología y calidad del agua, y evaluación del potencial de desarrollo del potencial de agua subterránea, este estudio dividió la Sub-Cuenca Oriental en tres cuencas hidrogeológicas, también que las condiciones hidrogeológicas en estas áreas son generalmente buenas desde el punto de vista de recarga, ya que son materiales volcánicos. El potencial de desarrollo del agua subterránea es aproximadamente (114,72 MGD). En este estudio también se creó un mapa hidrogeológico para la ciudad de Managua. Este estudio representa uno de los más completos y modernos que han sido realizados en la zona.

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), en la confección del *mapa hidrogeológico de la zona pacífica de Nicaragua*, con el objetivo de expresar el estado de aquella época de los conocimientos hidrogeológicos de la zona y así

facilitar las bases para la planificación de las actividades futuras en hidrogeología, utilizaron una metodología que consistió en la recopilación y estandarización de la información existente para la categorización y análisis para su posterior proceso cartográfico y publicación, como parte de las conclusiones 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. Este estudio es en el campo de la hidrogeología nicaragüense es considerado como de referencia por dar datos de las características regionales que pueden ser utilizadas como reseña a cualquier publicación.

2.1.2 Marco Teórico

2.1.2.1 Marco tectónico.

2.1.2.1.1 Marco tectónico regional.

América central está localizada en el margen Este de la placa del Caribe, la que está entre la placa Norteamericana y la Sudamericana. También la actividad de las Placas Oceánicas de Cocos y Nazca influyen el desarrollo tectónico de la región, la razón de su complejo patrón estructural (Frischbutter, 2002). Nicaragua está ubicada en el margen suroeste de la Placa del Caribe, cerca de su intersección con la Placa de Cocos. La Placa del Caribe limita al norte con la Placa Norteamericana, en el sistema de fallas transformantes Motagua-Polochic, de movimiento lateral izquierdo, al sur con la Placa Suramericana, al este con la Placa Cocos (Ilustración 2).

La Placa Cocos subduce hacia el noreste por debajo de la Placa Caribe, a lo largo de la Trinchera Meso-Americana (Peacock, 2005) con un ángulo de subducción de 65°, por debajo de Nicaragua, Barckhausen et al. (2001) y Protti et al. (1995), citados en Rüpke et al. (2002) y a una velocidad de 14 ± 2 mm/año (DeMets, 2001). Debido a la subducción de la Placa de Cocos por debajo de América Central, se originó la formación del Arco Volcánico de América Central (AVAC). Esta subducción bajo América Central, es ligeramente oblicua, con un

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

movimiento paralelo a la Trinchera Meso-Americana. Esta subducción oblicua, se debe al movimiento del bloque paralelo (bloque de antearco, de AVAC) y la Trinchera en dirección noreste (Avellán, 2009). Esto evidencia que la tectónica de Centroamérica, está caracterizada por un régimen de desplazamiento lateral derecho, con una componente de extensión ortogonal (DeMets, 2001; La Femina, 2002). En Nicaragua, el AVAC está representado por la Cadena Volcánica Nicaragüense, ubicada a lo largo de la región Oeste de Nicaragua.

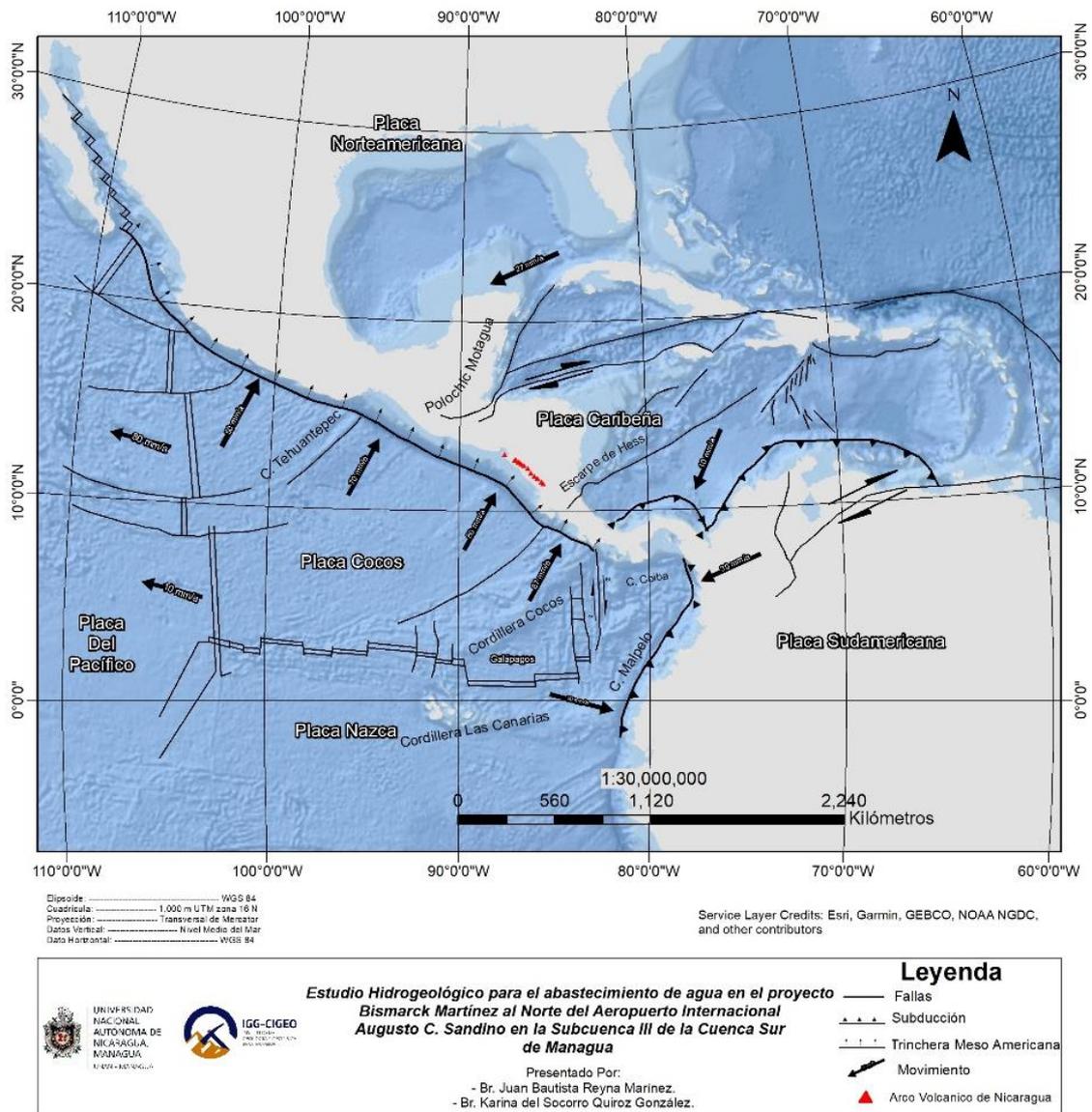


Ilustración 2. Mapa de rasgos tectónicos de Centroamérica y el Caribe, mostrando la Trinchera Meso-Americana, el sistema de fracturas Polochic -Motagua, escarpe de Hess, cadena volcánica nicaragüense, bloque Maya, Chortis, Chorotega y las Placas Coco y Caribe. Basado en Frischbutter, (2002) y Weinberg, (1992).

La depresión nicaragüense

La depresión nicaragüense es una de las estructuras morfológico-tectónicas que forman parte de la Zona Marginal Pacífica de Centro América con rumbo NO-SE que se extiende desde el Golfo de Fonseca hasta desaparecer en la Planicie Costera del Atlántico de Costa Rica. Su extensión excede los 500 km, con un ancho promedio de 50 km y una elevación variable entre los 35 y los 50 m.s.n.m (Weyl, 1980), casi todos volcanes cuaternarios de Nicaragua están en esta estructura (McBirney, 1965) Ilustración 3.

La depresión fue inicialmente interpretada por McBirney (1965) como un graben, posteriormente fue redefinida por Van Wyk de Vries (1993) como una zona de depresión bordeada por las elevaciones de las rocas volcánicas del terciario y la planicie costera del pacífico. El fallamiento principalmente consiste en fallas laterales izquierdas con rumbo noreste posiblemente generando una estructura de librero “bookshelf faulting” (La Femina, 2002). Este tipo de patrón podría ser una expresión inmadura del régimen tectónico lateral dextral¹, donde las fallas R´ prevalecen como sugiere Freund, (1974).

Tectónica local

El Graben de Managua

Van Wyk de Vries, (2005), considera que el Graben de Managua es una de las estructuras tectónicas más activas dentro de la Depresión Nicaragüense. Los principales sistemas de fallas tienen orientación N-NE y N (Ilustración 4). La falla punta Huete, ubicada al NO y la falla Cofradía, con escarpe que alcanza más de 100 m.s.n.m. ubicada al E, son los dos sistemas más evidentes (Sebesta, 1997). El sitio al occidente de la cuenca está delimitado por el complejo Nejapa-Miraflores, a lo largo del cual se encuentra una alineación de conos de ceniza basáltica y cráteres (Walker, 1984) y la falla Mateare, la falla con el escarpe más largo en Nicaragua (Van Wyk de Vries, 1993) Ilustración 4.

¹ Movimiento Lateral Derecho

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

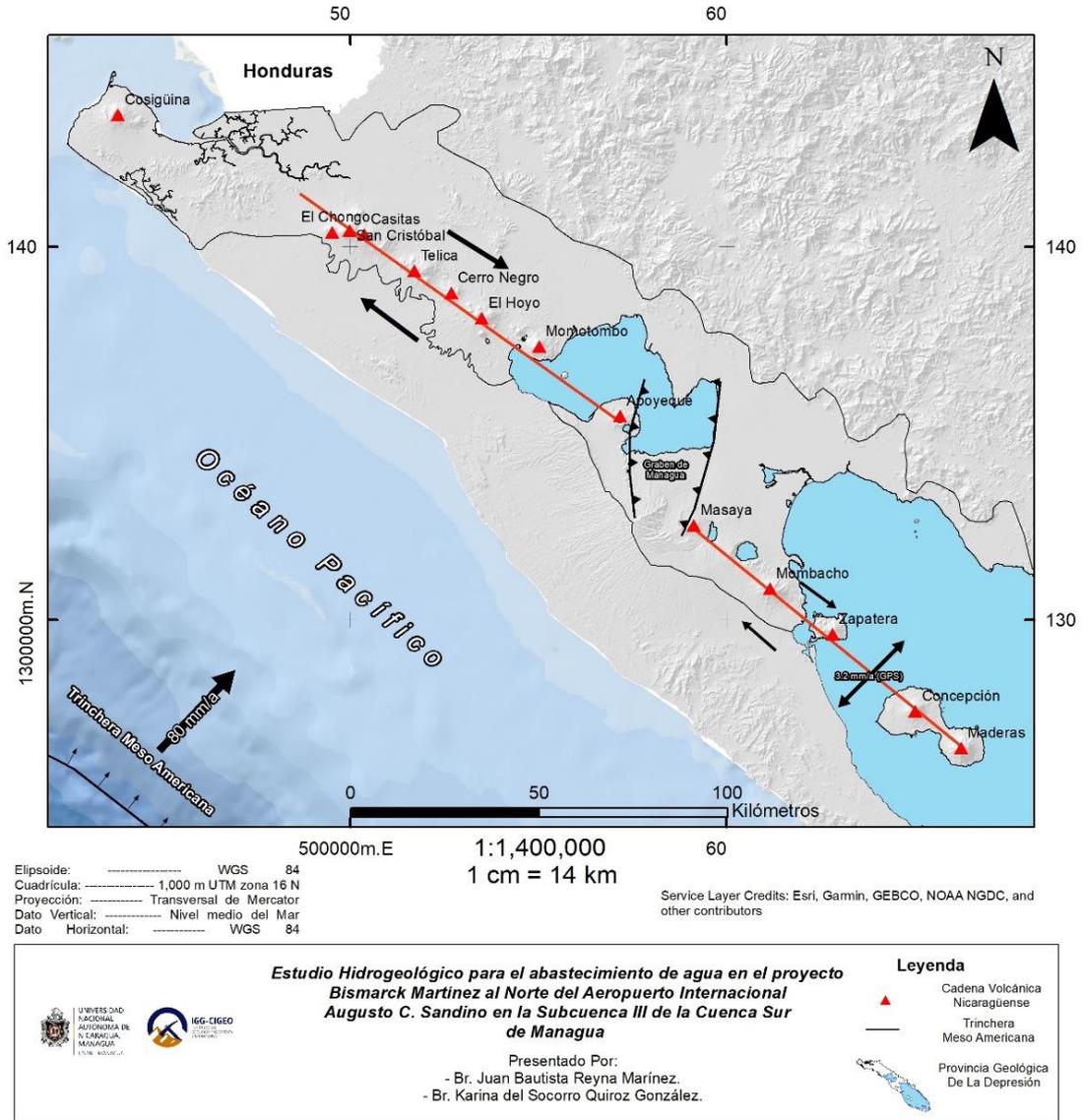


Ilustración 3. Mapa morfológico de la Provincia de la Depresión, con tasa de extensión por: Morgan, (2008) y tectónica por: Frischbutter, (2002).

El Graben Aeropuerto

Hacia la zona del Este de Managua se localiza otra estructura geológica denominada Graben el Aeropuerto, el cual está limitada por dos fallas de tipo normal: la falla Aeropuerto en el Oeste y la falla Cofradía en el Este. Frischbutter, (2002) haciendo análisis de trabajos previos y análisis de modelos digitales de elevación, de datos sísmicos y sensores remotos determinó patrones estructurales que se observan en el interior de la depresión. Las fallas que se observan en los alrededores y en la ciudad de Managua se dividen de acuerdo a sus indicadores estructurales y cinemáticos en dos grupos.

Dentro del primer grupo se encuentran las fallas normales con desplazamiento vertical con menor desplazamientos horizontales, como en el caso de la falla Cofradía en el margen este del Graben de Managua.

En el segundo grupo se incluyen las fallas que presentan un desplazamiento de tipo horizontal, lateral-izquierdo predominante. Dentro de este grupo están las fallas localizadas en la parte central de la ciudad Managua: Estadio, Los Bancos, Tiscapa, Chico Pelón y Escuela. Los sistemas principales se describen a continuación:

- a) Sistema de falla Cofradía: Conformada por 3 principales fallas normales en echelón², con rumbos locales variables N NE - S SO, donde el bloque diastrófico³ se localiza en el extremo E del Graben Aeropuerto. Es uno de los elementos estructurales más sobresalientes. Se puede localizar desde las vecindades del complejo del volcán Masaya en el sur, sigue a través de pueblo Cofradía hasta la costa oriental del Lago de Managua (Tellez, 2011).
- b) Falla aeropuerto: La falla aeropuerto conforma el límite este del Graben del mismo nombre. La falla es visible en superficie con una altura promedio de 4 a 6 m, observándose una inclusión al Este (Tellez, 2011), con desplazamiento de 2 a 4 metros, desplazando las unidades del Holoceno (González, 2012), presenta abertura de 3 a 5 centímetros rellenos por carbonatos (Darse, 1994). Se extiende hacia el sur localizada a 100 m del reparto Las Colinas, pasando por el Reparto Schick y luego hacia el Norte hasta el Lago de Managua. Su longitud es estimada en 15 km con orientación N-S a N40°E en su extensión sur, con un ancho de 20 metros y desplazamiento mínimo de 5 metros (Kuang, 1971).

² Forma de segmentación de las fallas, fracturas, diaclasas, a causa de movimiento extensional lateral.

³ Bloque que cambió su estructura inicial a causa de tectonismo.

Estructuras menores intra Graben Aeropuerto:

- a) Falla Las Mercedes: Esta atraviesa la pista de aterrizaje del Aeropuerto Internacional de Nicaragua, falla Normal activa, con dirección N39°E. Los desplazamientos varían entre 0.60 a 1.80 m, medidos en los estratos del holoceno (Garayar, 1977; Woodward, 1975).
- b) Falla los bomberos: Localizada a 200 m al Este de la falla Las Mercedes, Johnson y asociados; Hodgson, (1978), consideran esta falla como normal, activa con el Bloque Oeste de Piso⁴ y el Este de Techos⁵, con desplazamientos en los estratos del Holoceno de 1 – 1.15 m. con una longitud de 9 km, su dirección es variable entre N-S a NO- SE (González, 2012).
- c) Falla Occidente: Se localiza a una distancia de 1000 m hacia el Oeste de la falla Las Mercedes. Considerada como falla Normal activa, con rumbo N20°E (Johnson y asociados, 1978; Garayar, 1977).
- d) Falla ENAG: Está representada como un pequeño escarpe que cruza la Carretera Norte. Se presentan fracturas con rumbo N3°O con buzamiento 10°E (González, 2012).

⁴ Bloque que se desplaza sobre el plano de falla en favor de la gravedad.

⁵ Bloque que está arriba del plano de falla.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

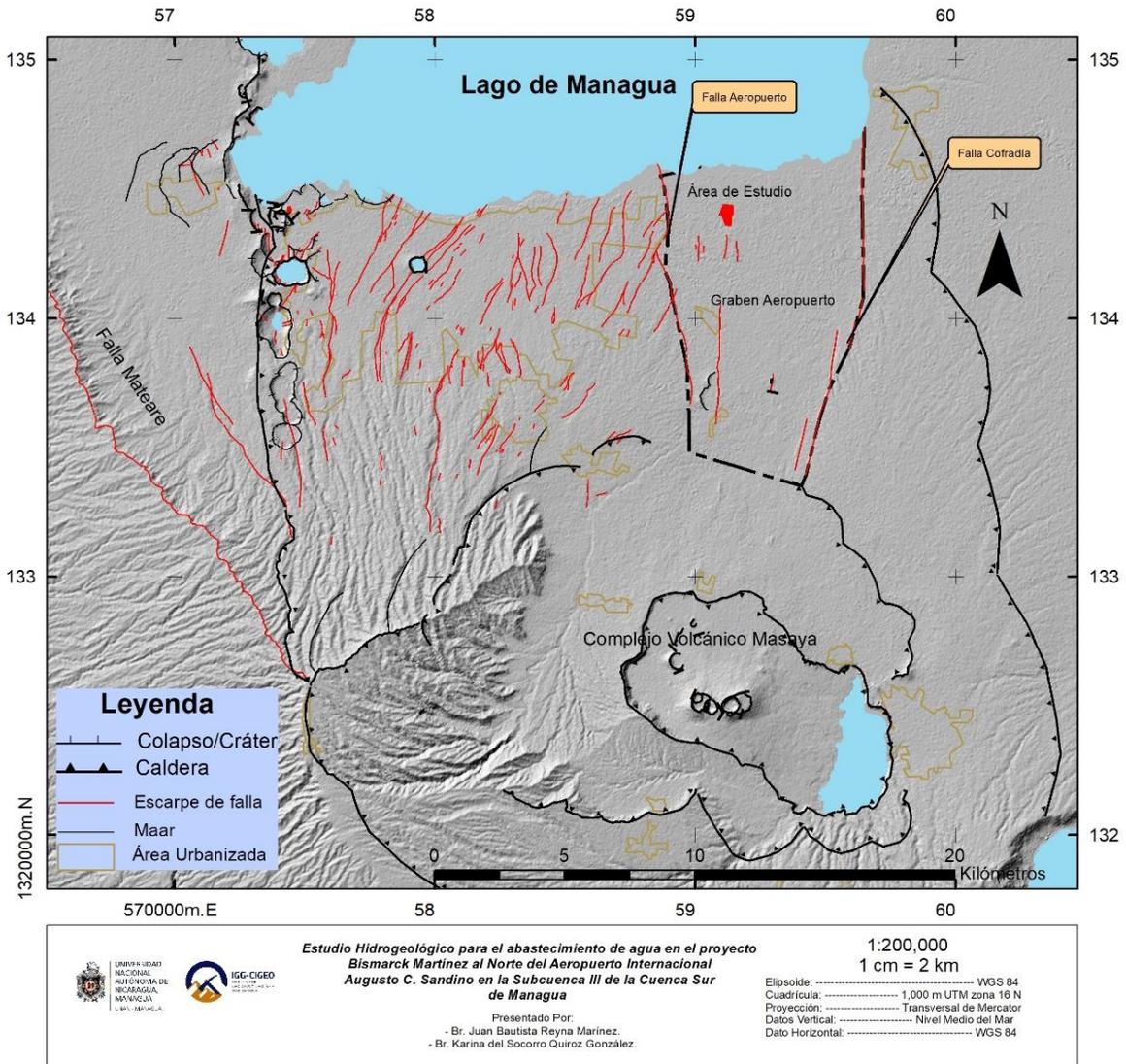


Ilustración 4. Mapa estructural con MDE de fondo, que muestra el Graben de Managua, el sistema de Fallas y de Calderas. Basado en: (Walker, 1984; Sebesta, 1997; Brown et al., 1973; Van Wyk de Vries, 1993; 2005; INETER, 2007; Frischbutter, 2002; Espinoza, 2007; Avellán, 2009).

2.1.2.2 Marco Geológico

2.1.2.2.1 Geología Regional

Nicaragua, ubicada en la placa caribeña que está dividida en dos bloques denominados: el bloque Chortis y bloque Chorotega. La parte Norte está constituida por Guatemala, Belice Honduras y el Norte de Nicaragua, que los investigadores han dividido en los bloques Maya y Chortis. El bloque Maya corresponde con el extremo sur de la placa de Norte América y el bloque Chortis está sustentado por un basamento del precámbrico Paleozoico de la Placa Caribe (Bundschuh y Alvarado, 2007). La otra parte de Nicaragua, Costa Rica y

Panamá tienen un basamento de origen oceánico y conforman el Bloque Chorotega en el sur de Nicaragua (Denyer, 2008).

La división geológica de Nicaragua fue hecha por Hodgson (1977) según las características litológicas, estratigráficas, tectónicas, históricas y geomorfológicas de cada localidad. La división fue hecha por medio de provincias geológicas (Ilustración 5) las que se enuncian a continuación:

- a. Provincia Geológica de las Planicies de la Costa del Pacífico.
- b. Provincia Geológica de la Depresión.
- c. Provincia Geológica Central.
- d. Provincia Geológica del Norte.
- e. Provincia de Los Llanos de la Costa Atlántica.

2.1.2.2 Provincia Geológica de la Depresión Nicaragüense

Esta provincia separa a la Provincia Geológica de la Costa del Pacífico de la Provincia Geológica Central. Consiste básicamente de una secuencia de sedimentos volcánicos Cuaternarios interestratificados con sedimentos aluviales. El espesor de los depósitos es aproximadamente 2000 m, con más de 300 Km de longitud y 70 Km de ancho que atraviesa todo el pacífico de Nicaragua, desde el Golfo de Fonseca en el NO, hasta la frontera con Costa Rica; contiene la cadena volcánica nicaragüense y los dos Lagos. Los materiales litológicos provienen del desmantelamiento de las estructuras marginales vecinas y de depósitos de origen volcánico como lapilli, cenizas y lavas (Woodward, 1975).

Estos depósitos se subdividen en dos grandes grupos: Las Sierras y Managua. El Grupo Las Sierras de edad Pleistoceno, sobreyace a la Formación El Salto, y está compuesto por tobas andesíticas, dacítas, tobas aglomeráticas y líticas. El grupo Managua de edad Pleistoceno superior y Holoceno, está conformado por depósitos piroclásticos inconsolidados y tobas (McBirney, 1995; 1956; Kuang, 1971; Woodward, 1975; Garayar 1974; 1983; Bice, 1980; Rodríguez, 1974; 200, entre otros).

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

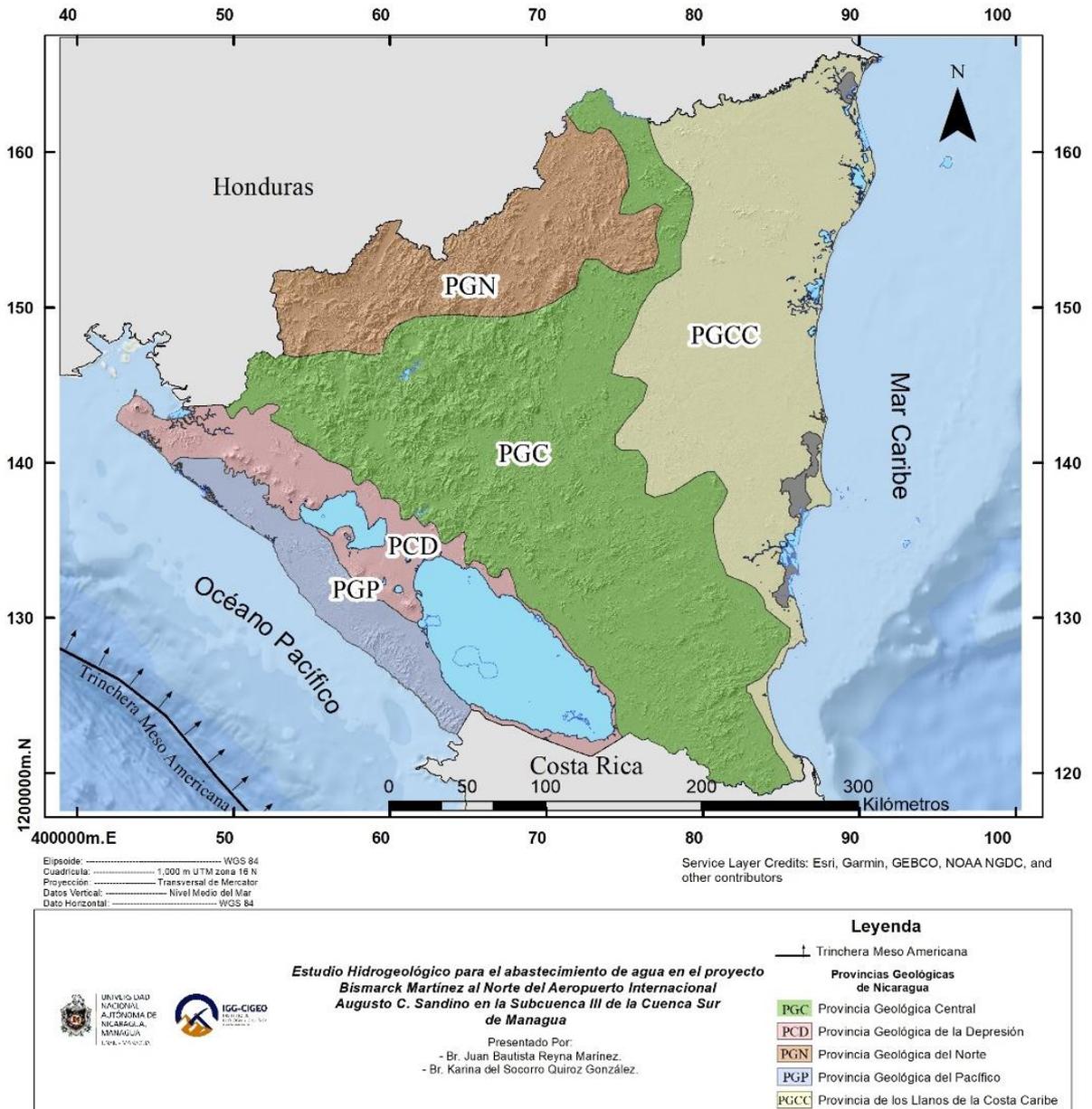


Ilustración 5. Mapa de las Provincias Geológicas de Nicaragua (Hodgson, 2000).

2.1.2.2.3 Geología local y Estratigrafía

Los primeros estudios geológicos y estratigráficos en el Graben de Managua fueron desarrollados por McBirney & Williams (1965); Kuang (1971); Bice (1985) y Sussman (1985). Más recientemente, estudios de geología estructural e historia eruptiva de volcanes monogenéticos y la Caldera Masaya han sido presentados por Girard & van Wyk de Vries (2005); Pérez y Freundt (2006); Wehrmann et al. (2006); Kutterolf et al (2007); Espinoza (2007); Pardo (2008); Raush (2010) y Avellán (2009; 2014).

Avellán (2009) hizo una descripción detallada de la historia estratigráfica de la parte Oeste de Managua, pero es particularmente centrada en el complejo Volcánico de Nejapa. También continuó con la clasificación de Kutterolf et al. (2007) relacionada con Las Formaciones: Las Sierras, Chiltepe y Managua. Propuso una nueva secuencia estratigráfica del Oeste de Managua.

Dichos trabajos Geológicos, permitieron agrupar los depósitos piroclásticos del grupo Las Sierras de Kuang J. y Woodward, 1975 en dos grupos:

- i. El superior correspondiente al sub grupo Managua
- ii. El correspondiente al grupo las Sierras propiamente que se divide:
 - a. Un grupo superior aerolítico, o depósito de caída, grupo las Nubes de INETER.
 - b. Un miembro medio comprendido por depósitos de flujos de lodo (cantera aglomeráticas)

La Sierra Inferior (QTpsi): Comprende afloramientos de los depósitos de las Maderas y Las Banderas, depósitos al E de Managua (Cofradía y la costa del lago), depósitos de pómez de Malpaisillo-La Paz Centro y depósitos de la Cordillera de Diriamba, Carazo y S del escarpe las Nubes (El Crucero), Escarpe Mateare.

- 1) Miembro superior (de Las Sierra Inferior) QTpss: El grupo comienza con depósitos aerolíticos de S del escarpe de las Nubes- Carazo, y comprende horizontes de piroclastos de Lapilli, Pómez y Ceniza-Toba, ocupando la parte más alta de las Sierras de Managua.
- 2) Miembro Inferior (de Las Sierras inferior) QTpsi: Tobas aglomeráticas, brechosos, grisáceas, tipo Diriamba y diagnóstico de este tipo de toba y la toba pumicea ocupa la base de la Sierra inferior, la parte superior es una zona de transición con toba aglomeráticas.
- 3) Miembro de Malpaisillo-la Paz Centro, Nagarote. Parte más baja de la Sierra inferior: Kuang (1971) señala a estos depósitos como piroclastos indiferenciados. La pómez se presenta muy heterogénea, muy erosionada

y bien compactada transformado en toba, que conserva su color blanco-rosado, ligeramente amarillenta por la meteorización.

i. El Sub-Grupo Managua

Comprende piroclastos poco consolidados. Dispuestos horizontalmente y bien definidos. Incluye ceniza, ceniza compactada, toba, pómez, lapilli, lahar y flujos de lodos, intercalaciones de lentes menores de los mismos piroclastos de estructuras volcánicas locales, suelos fósiles y aluvionales. Este grupo está superpuesto a Las Sierras.

- a) Formación Toba El Retiro (Hrt): Comprende depósitos aerolíticos de ceniza fina basáltica, de color gris verdoso compactada, constituyendo una toba masiva ligeramente friable. Por la meteorización la parte superior se transforma en un cuerpo amarillo friable. Cuyo suelo residual en las áreas rurales se denomina "Talpetate" por su dureza de excavar.
- b) Formación de Pómez de Apoyeque (Haq): Comprende tres unidades separadas de pómez blanco, provenientes del volcán Apoyeque durante el Holoceno-Pleistoceno. Una debajo de la formación Hrt, y dos o tres horizontes bajo la formación Hsj (Bice, 1980).
- c) Formación San Judas (Hsj): Se trata de dos o tres capas de tobas endurecidas y friables, separadas por depósitos de Lapilli incoherente, (basáltica). Este Horizonte recibe también el nombre de "Triple capa Masaya".

Esta última, es un excelente registrador de los desplazamientos causados por las fallas, aunque a veces el lapilli ha sido meteorizado, la toba endurecida permanece intacta, y registra las deformaciones originales en el área.

- d) Secuencia Miraflores-Nejapa: Los productos de esta secuencia provienen de conos cinderíticos, maares y algunos volcanes extintos como son: Cráter de Santa Ana a 2 km del SO de Nejapa, Cráter explosivo de Asososca, Volcán Chiltepe y Motastepe, generalmente están asociados con el lineamiento tectónico Miraflores-Nejapa, extendiéndose desde el volcán Chiltepe en el N hasta el S de la estructura.
- e) Miembro Ceniza Motastepe. (HPma): Se trata de varias unidades individuales de Tefras de Ceniza-Lapilli fina de color típico gris claro, con

la presencia a veces de bloques erráticos. Se cree que proviene de conductos o fallas a lo largo de la caldera Nejapa.

- f) Secuencia de Ceniza de Tiscapa. (HPti): Comprende de capas interestratificadas de gruesas a finas de lapilli y ceniza de color claro a gris, se encuentra en la vecindad o hasta un Km fuera de la caldera de Tiscapa.
- g) Unidad de pómez de Apoyeque bajo San Judas: Se trata en la mayoría de los casos de 2 a 3 horizontes de pómez aerolíticos blanco-gris, esponjoso, vesicular, vidrioso, tamaño Lapilli.
- h) Unidad pómez Apoyeque inferior. (Hq-3): Se trata de una pómez blanca de granulometría Lapilli fina a arena, no se presenta estratificada. Y se encuentra directamente asociado con la Pómez medio (área de Managua).
- i) Miembro Lapilli Negro (PbL): Se trata de Lapilli negro suelto con un alto contenido de tamaño de arena y ceniza negra limosa.
- j) Formación Pómez Apoyo. (Pap): Se trata de pómez dispuesto en tres unidades separadas, las cuales están separadas por suelos fósiles. En las dos unidades superiores, generalmente hay una transición de partículas finas en la base a gruesas en el techo.
- k) Formación Fontana Lapilli (Pfl): Está ampliamente distribuido y es fácilmente reconocible. Se trata de lapilli negro basáltico, libre de cenizas –polvo, suelto. En los afloramientos normalmente se ven tres franjas o hilos blancos de pómez, tierra o caliche. Estos reflejan las fracturas y flujos de aguas subterráneas o de aguas de lixiviación desde el suelo fósil hasta la base de la unidad.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Conceptos Fundamentales Hidrogeología:

- Acuífero: unidades geológicas permeables, saturadas de agua, que pueden ser explotadas factiblemente.
- Acuitardo: unidad geológica que deja pasar el agua por sus poros, pero que no tiene la capacidad de ceder grandes caudales.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

- Acuicludo: unidad geológica que, a pesar de contener agua, no la transmite.
- Acuífugo: unidad geológica que no contiene agua, ni puede transmitir.

2.3.1.1 Tipos de acuíferos:

- Acuíferos libres: un acuífero se considera libre cuando tiene como límite superior la superficie freática y como inferior, una unidad confinante.
- Acuífero confinado: un acuífero confinado es aquel que se encuentra limitado en su parte inferior y superior por unidades geológicas confinantes o "impermeables".
- Acuífero semiconfinado: un acuífero semiconfinado es aquel que se encuentra limitado por Acuitardos.

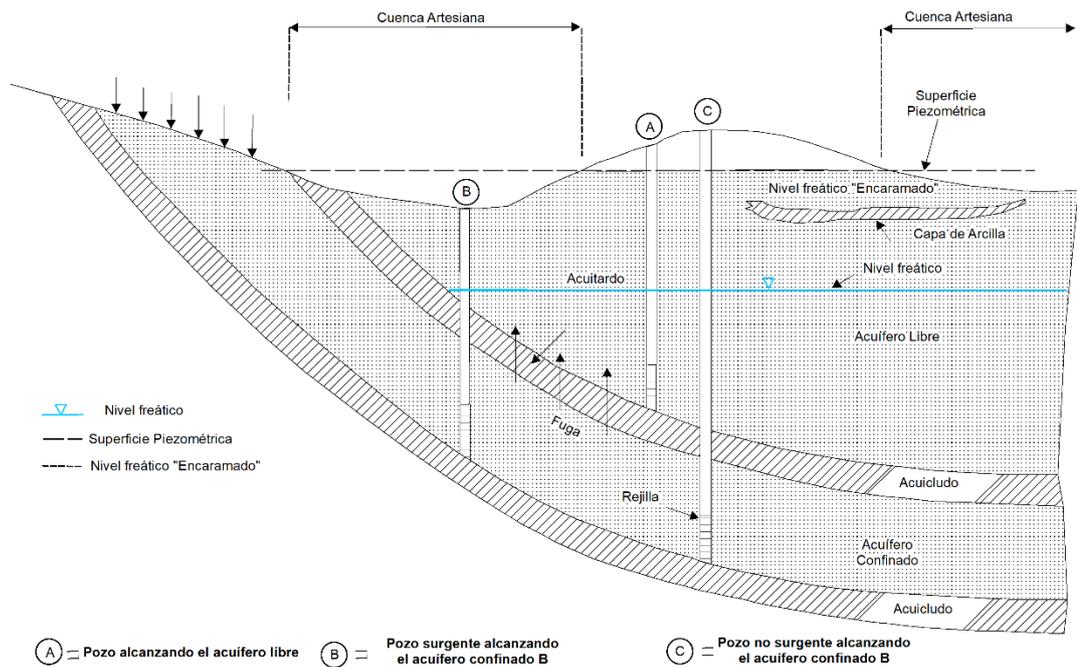


Ilustración 6. Tipos de Acuíferos. Fuente: (Singhal, 2010)

2.3.1.2 La Ley de Darcy

La ley de Darcy es la base para el análisis del comportamiento y movimiento del agua subterránea a través de medios porosos. Establece que el caudal que pasa por un área transversal con una pendiente de cargas distinta

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

en una longitud, estará en dependencia del tipo de material, el área y el cambio de las cargas en dicha longitud. Como las unidades del caudal Q son L^3/T , la sección es L^2 , Δh e ΔL son longitudes, se comprueba que las unidades de la conductividad hidráulica (K) son las de una velocidad (L/T) (Ecuación (1)).

$$Q = -K.A \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (1)$$

Dimensiones:

Q = caudal [L^3/T]

K = conductividad hidráulica [L^2/T] (depende del material y del fluido)

$\Delta h/\Delta l$ = gradiente hidráulico [adimensional]

A = área transversal perpendicular al flujo [L^2]

El gradiente Hidráulico:

Es la pendiente de la curva que representa la superficie piezométrica. Está definido como la pérdida de carga por unidad de longitud, como se ejemplifica en la Ilustración 7.

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (2)$$

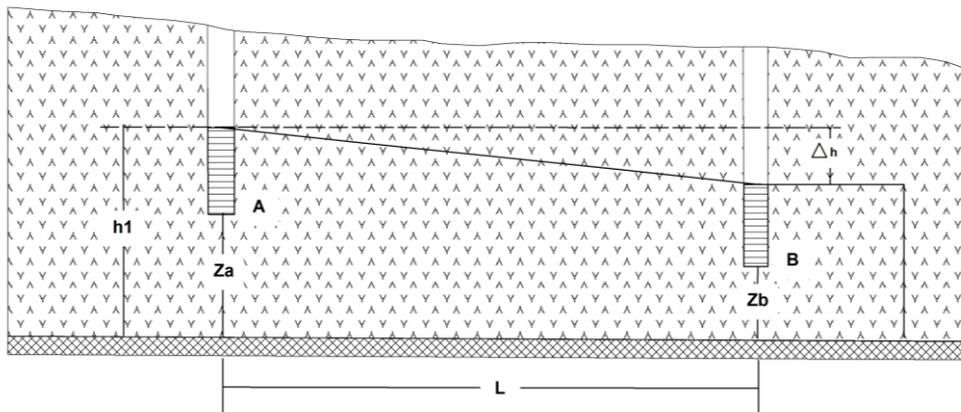


Ilustración 7. Gradiente Hidráulico. Fuente: (Otálvaro, 1999)

2.3.1.3 Propiedades Hidráulicas:

Son parámetros que determinan la cantidad de agua que puede almacenar, transmitir y ceder un acuífero. Estas dependen de los factores geológicos, desde su granulometría, hasta la composición mineralógica.

Conductividad hidráulica:

Es la cantidad de agua, que, bajo condiciones físicas, circula a través de una sección de área unitaria, bajo un gradiente hidráulico unitario. Depende de las características del fluido y de la permeabilidad del medio en el que se transporta. También conocida como velocidad de Darcy. No es una velocidad verdadera, como en una sección transversal, ya que es parcialmente bloqueada por el material granular.

Las dimensiones del coeficiente de permeabilidad (K) son L/T, las que pueden ser demostrados reescribiendo la ecuación (1) como:

$$K = -\frac{Q}{A i} \quad (3)$$

La siguiente tabla muestra de algunos valores de conductividad hidráulica para diferentes materiales geológicos:

Tabla 2.1. Algunos Valores de Conductividad Hidráulica

Material	K (m/d)	K (cm/s)
Arcillas	10^{-5} a 10^{-7}	10^{-8} a 10^{-10}
Limos	10^{-1}	10^{-4}
Arena Fina	10^{-1} a 10^0	10^{-4} a 10^{-3}
Arena Media	10^0 a 10^2	10^{-3} a 10^{-1}
Grava	$>10^3$	$>10^0$

Fuente: (Kruseman, 1994)

Transmisividad:

Es una propiedad que tiene relevancia al momento de la evaluación de los sistemas acuíferos. Determina el rendimiento del espesor que atraviesa el pozo. Con ella se puede calcular la cantidad de agua que puede proporcionar un acuífero.

$$T = K \cdot b \quad (4)$$

Dimensiones:

T = Transmisividad del acuífero (L^2/T)

K = Conductividad Hidráulica promedio (L/T)

b = Espesor saturado del acuífero (L)

Coeficiente de almacenamiento (S):

Es la capacidad que tiene un acuífero para almacenar o ceder agua, esta depende de manera directa, tanto de las características del agua, como de las condiciones petrofísicas e hidráulicas del acuífero. Se define como la cantidad de agua que libera una columna del acuífero, de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado. Generalmente se conoce que el coeficiente para acuíferos libres varía entre 0.02 a 0.30 (Fetter, 2014)

El coeficiente de almacenamiento en acuíferos confinados se puede obtener mediante la ecuación:

$$S = S_s \cdot b \quad (5)$$

Dimensiones:

S = Coeficiente de almacenamiento promedio del acuífero confinado (adimensional)

S_s = Coeficiente de almacenamiento específico del acuífero confinado (L^{-1})

b = Espesor saturado del acuífero confinado (L)

El coeficiente de almacenamiento específico (S_s), se define como la cantidad de agua liberada o retenida por un volumen unitario de material del acuífero confinado, cuando el nivel del agua desciende o asciende una unidad.

Se determina mediante:

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta) \quad (6)$$

Dimensiones:

S_s = Coeficiente de almacenamiento específico [L^{-1}]

ρ = Densidad del Agua [M/L^3]

g = Valor de la aceleración de la gravedad [L/T^2]

α = Compresibilidad del acuífero [F/L^2]

n = Porosidad [adimensional]

β = Compresibilidad del agua [F/L^2]

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

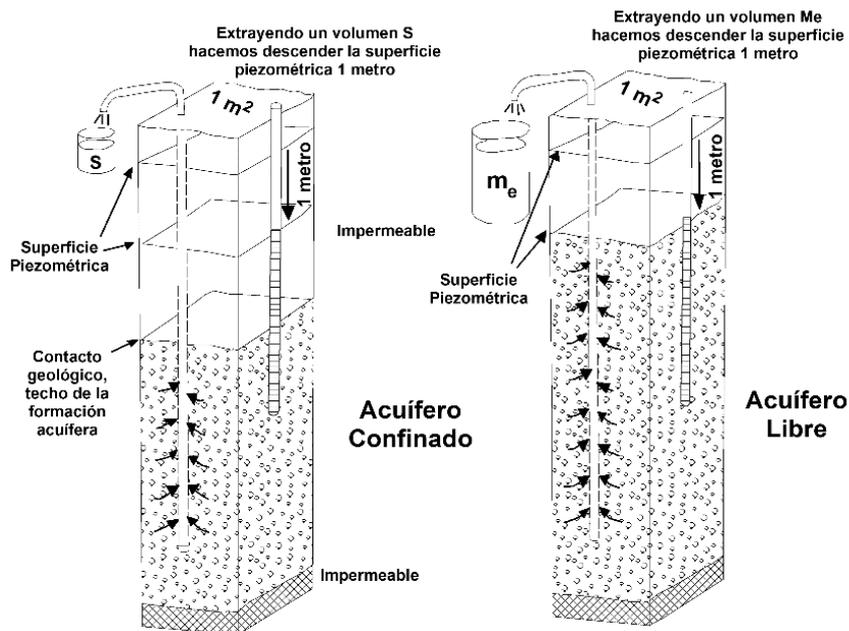


Ilustración 8. Representación del concepto de coeficiente de almacenamiento. Fuente: (Sanchez, s.f.)

2.3.1.4 Mapas de Isopiezas:

Son representaciones en dos dimensiones de las profundidades de las aguas subterráneas (superficie freática ⁶para acuíferos libres) y de la superficie potenciométrica del agua (superficie piezométrica ⁷para acuíferos confinados), según sea el caso, igual que un mapa topográfico refleja la forma de la superficie del terreno.

2.3.1.5 Hidráulica de captaciones

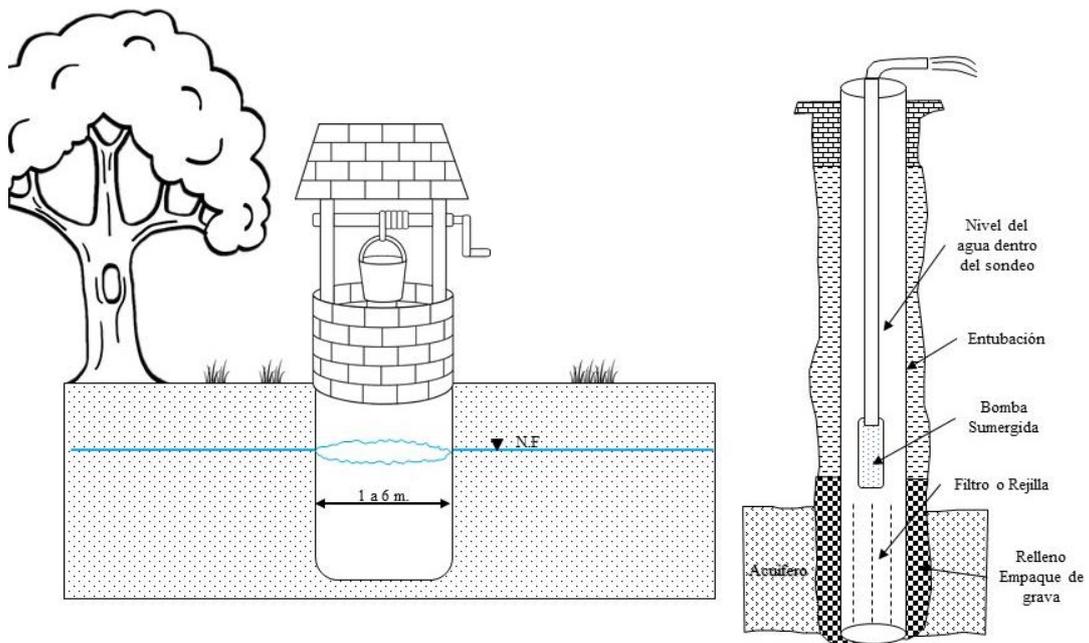
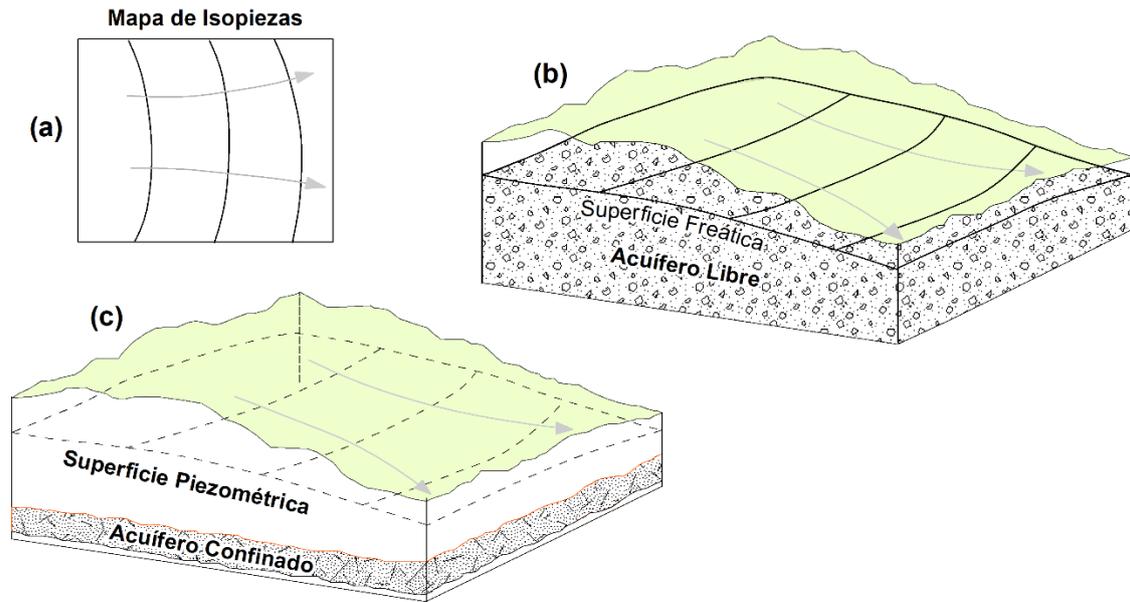
Tipos de captaciones:

- Pozos excavados: son excavaciones hechas generalmente a mano, con diámetros menores a los seis metros y profundidad hasta 20 metros.

⁶ Corresponde al límite donde empieza la zona saturada,

⁷ No siempre coincide con la zona saturada del terreno, se da cuando capas confinantes elevan la presión del agua, cuando esta es liberada, es expulsada hacia la superficie.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



- Sondeos: Son excavaciones generalmente con barrenas, es la metodología más utilizada en la actualidad. El diámetro varía desde unos centímetros, hasta varios metros. La profundidad depende de las capacidades para la instalación, varían desde menos de 10 metros, hasta cientos de kilómetros.

Régimen permanente:

El flujo en régimen permanente es independiente del tiempo. Eso quiere decir que el nivel del agua que fluye hacia un pozo, no cambia con el tiempo. Se dice que se ha alcanzado un flujo en régimen permanente, si los cambios en el nivel del agua son pequeños con respecto al tiempo.

Régimen transitorio:

Es una función del tiempo y se presenta al momento de iniciar el bombeo, hasta que se alcanza el flujo en régimen permanente. El flujo se considera en régimen transitorio, mientras se presenten y sean medibles cambio en el nivel del agua, en el pozo de bombeo como en piezómetros de observación.

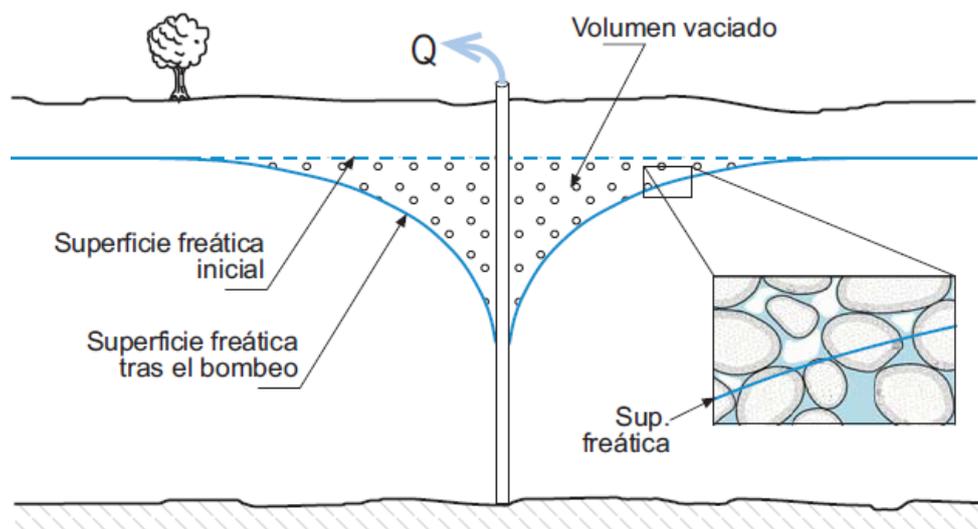


Ilustración 11. Modelo Simplificado: el acuífero libre entrega agua vaciando sus poros. Fuente: Sanchez, (s.f.)

2.3.1.6 Pruebas de Bombeo

Objetivos de la prueba: tienen dos objetivos principales; el primero es determinar las características hidráulicas de los acuíferos. Este tipo de pruebas estudian al acuífero y al pozo y no a la bomba, son llamadas también pruebas de acuífero.

El segundo objetivo es proporcionar los datos necesarios para determinar la capacidad específica o relación “caudal-abatimiento”, para seleccionar el equipo de bombeo adecuado.

2.3.1.7 Rendimiento Sostenible de agua subterránea

Se trata de un concepto que ha sido definido por distintos autores muy ambiguamente, según el caso, la rama de ciencias y los objetivos de cada uno.

Lee (1915), como se citó en (Ponce V. , 2007)) definió el rendimiento seguro como el límite de la cantidad de agua que se puede extraer de forma regular y permanente sin un agotamiento peligroso de la reserva de almacenamiento. Señaló que el agua extraída permanentemente de un reservorio subterráneo reduce en igual cantidad el volumen de agua que pasa de la cuenca por cauces naturales, es decir, la descarga natural. Para ilustrar la existencia de esta descarga natural, Lee observó que el bombeo pesado comúnmente daría como resultado el secado de manantiales y humedales. Así, distinguió entre un rendimiento seguro teórico, igual a la recarga natural, y un rendimiento seguro práctico, valor menor que tiene en cuenta la necesidad de mantener una descarga residual.

También (Ponce V. , 2007) citando a Theis (1049), asevera que, la descarga por bombeo es una nueva descarga superpuesta a un sistema previamente estable; en consecuencia, debe equilibrarse mediante: (a) un aumento de la recarga natural; (b) una disminución en la descarga natural; (c) una pérdida de almacenamiento en el acuífero; o (d) una combinación de los mismos.

2.3.2 Conceptos Fundamentales Geofísicos:

2.3.2.1 Prospección Geofísica

Son métodos que aplican los principios físicos al estudio de la tierra, implican tomar medidas en o cerca de la superficie de la Tierra que están influenciadas por la distribución interna de dichas propiedades. El análisis de estas mediciones puede revelar cómo las propiedades físicas del interior de la Tierra varían vertical y lateralmente (Kearey, Brooks, & Hill, 2003).

Prospección eléctrica

Los métodos de prospección eléctrica de corriente continua se fundamentan en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica, natural o inducida, por el subsuelo.

Conceptos básicos:

Si se introduce un par de electrodos en la superficie plana de un terreno homogéneo e isótropo y se hace circular una corriente eléctrica continua de intensidad (I), se puede registrar la caída de potencial (ΔV) que existe, también en superficie, entre dos puntos del terreno. A través de estas medidas y en base a la ley de Ohm, puede conocerse la resistividad de los terrenos involucrados en el circuito.

La ley de Ohm expresa que la Resistencia (R) que ofrece un conductor al flujo de una corriente, es directamente proporcional a la diferencia de potencial (ΔV) entre los extremos del material e inversamente proporcional a la intensidad (I) del flujo de corriente.

$$R = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (7)$$

Dimensiones:

R = Resistencia [V/A]

ΔV = Diferencia de potencial [V]

I = Intensidad del flujo de corriente [Q/T]

La unidad de medida de la resistencia es el Ohmio, que surge de la siguiente definición: Cuando por un conductor se hace circular una corriente de intensidad $I = 1$ Amperio, y la diferencia de potencial entre sus extremos es de 1 Voltio, la Resistencia es de $R = 1$ Ohm (Ω).

La resistividad (también llamada resistencia específica) es la propiedad petrofísica del método geoelectrico, es una constante propia e intrínseca de cada material, independientemente de su forma. La unidad de medida es el Ohm metro ($\Omega.m$). La Tabla 2.2 muestra las resistividades de aguas y tipos de rocas presentes en el subsuelo.

Tabla 2.2. Resistividades de las aguas y rocas

Aguas o rocas	Resistividad (Ohm m)
Agua del mar	0.2
Agua de acuíferos aluviales	10-30
Agua de fuentes	50-100
Arenas y gravas secas	1000-10000
Arenas y gravas con agua dulce	50-500
Arenas y gravas con agua salada	0.5-5
Arcillas	2-20
Margas	20-100
Calizas	300-10000
Areniscas arcillosas	50-300
Areniscas cuarcitas	300-10000
Cineritas, tobas volcánicas	20-100
Lavas	300-10000
Esquistos grafitosos	0.5-5
Esquistos arcillosos o alterados	100-300
Esquistos sanos	300-3000
Gneis, granito alterados	100-1000
Gneis, granitos sanos	1000-10000

Fuente: Astier, (1975)

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (8)$$

Dimensiones:

ρ = Resistividad [V/A * L]

R = Resistencia [V/A]

A = Área transversal [L²]

L = Longitud [L]

La Ilustración 12 muestra el principio de medición de la resistividad del suelo, al “inyectar una corriente entre el par de electrodos AB que se clavan en el suelo y una vez establecido un campo eléctrico artificial, medir la diferencia de potencial ΔV entre el par de electrodos MN”. Las distancias entre electrodos se varían convenientemente para alcanzar diferentes profundidades (Cantos Figuerola, 1974).

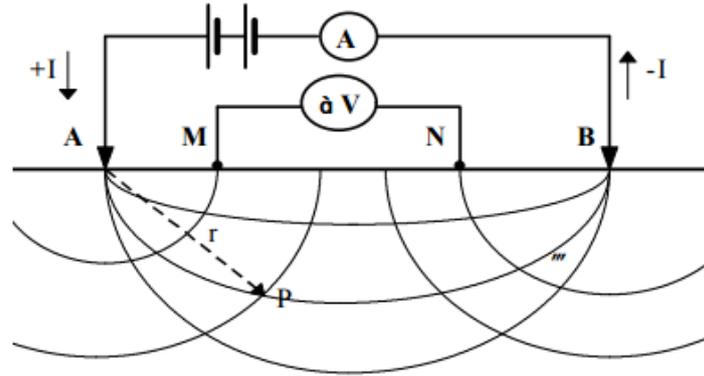


Ilustración 12. Diferencia de potencial. Fuente: Díaz Anaya, (2010)

El método convencional de medición estima la resistividad aparente del subsuelo mediante el uso de cuatro electrodos; dos de corriente y dos de potencial, como se muestra en la Ilustración 12.

La resistividad del suelo se calcula a partir de la diferencia de potencial entre M y N donde:

$$V_{M-N} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (9)$$

De la ecuación (9) se deduce que

$$\rho a = \frac{\Delta V 2\pi}{I \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]} \quad (10)$$

Donde:

$$\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] = G \quad (11)$$

G es el factor geométrico, que depende de la configuración del electrodo.

Existen distintos tipos de arreglos o disposiciones electrónicas diseñados para estudios específicos y con un factor de geometría diferente. En este estudio se utilizó el arreglo de gradiente.

El levantamiento con arreglo gradiente con múltiples electrodos se realiza inyectando corriente con una separación $(s+2)a$ y simultáneamente o recogiendo secuencialmente todas las diferencias potenciales entre los electrodos potenciales con espaciado “a”. Aquí, el factor de separación “s”, un número entero, es el número máximo de lecturas potenciales para una inyección de corriente. El factor n puede definirse como el espaciado relativo entre el dipolo de potencial y el electrodo de corriente más cercano. Además, puede resultar práctico definir un factor de punto medio m como la posición del punto medio del dipolo del electrodo de potencial en relación con el punto medio de los dos electrodos de corriente, es decir:

$$m = \frac{\frac{(X_M + X_N)}{2} - \frac{(X_A + X_B)}{2}}{X_N - X_M} = \frac{X_{MN} - X_{AB}}{a} \quad (12)$$

Dimensiones:

X_A, X_B, X_M, X_N = son las posiciones de la corriente y el potencial electrodos ($X_B > X_A, X_N > X_M$).

X_{AB}, X_{MN} = son los puntos medios de los dipolos respectivos.

La matriz de gradiente es adecuada para la adquisición de datos multicanal y puede aumentar significativamente la velocidad de adquisición de datos en el campo y, al mismo tiempo, proporcionar una mayor densidad de datos Dahlin, Torleif & Zhou, Bing. (2006).

Tomografía Eléctrica:

La obtención de un modelo 2D de resistividades eléctricas se le denomina Tomografía Eléctrica (TE). La TE permite representar los datos de resistividad del subsuelo en forma de pseudosecciones y la inversión de las medidas nos proporcionan una imagen del modelo de resistividades del subsuelo.

Modelo de resistividad

La inversión de datos de tomografía eléctrica está basada en el método de mínimos cuadrados (M. H. Loke, 1996). La resistividad aparente se expresa como una serie de Taylor, con el objetivo de obtener valores de resistividades aparentes en la vecindad de los datos capturados durante el trabajo de campo, con lo cual se conforma la pseudo sección de resistividades aparentes que posteriormente será empleada para el cálculo del modelo.

Registro Geofísico de Pozos:

Los registros geofísicos de pozo están basados en el registro e interpretación de diferentes tipos de señales naturales o estimuladas artificialmente mediante un instrumento, y cuyas características dependen de las propiedades litológicas, geométricas, y también en cierta medida, la calidad del agua contenida a lo largo del pozo.

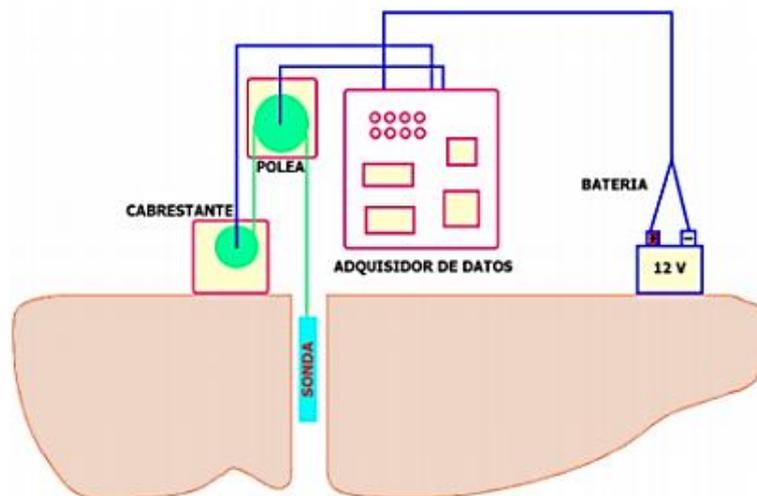


Ilustración 13. Esquema de un registro geofísico de pozo. Fuente: http://caminos.udc.es/info/asiñaturas/grado_itop/415/pdfs/Tema%2012%20Exploracion%20y%20prospeccion.pdf

Registro Eléctrico (resistividades cortas y largas):

Es un registro en el que transmite una corriente entre dos electrodos ubicados a lo largo de la sonda. Las mediciones se realizan con dos espacios entre electrodos. La primera distancia de 16” (también conocida como “short

normal” o resistividad corta) proporciona mediciones influenciadas por el lodo utilizado durante el proceso de perforación en la zona invadida y proporciona una resolución de capa vertical relativamente buena a un espesor de aproximadamente 0,5 metros. La segunda distancia es normalmente de 64” (conocida como “long normal” o larga) tiene una profundidad mayor de penetración en la roca de 2 metros de espesor. La resistividad larga, tienen una lectura más profunda y lee la resistividad de la zona no invadida, es decir la resistividad verdadera. Al ejecutar este registro, se puede hacer una estimación de la porosidad y la ubicación de las zonas permeables y el contenido de sales.

Resistividad puntual:

El registro de resistencia puntual es un método en el que se miden las resistividades de las rocas con dos electrodos, uno en la sonda y el otro en la superficie del terreno. La resistencia aumenta al aumentar el tamaño del grano y disminuye al aumentar el diámetro del pozo, la densidad de fractura y la concentración de sólidos disueltos del agua. Los registros de resistencia puntual son útiles para determinar la litología, la calidad del agua y la ubicación de las zonas de fractura.

Registro Gamma:

El registro de gamma determina la cantidad de radiación gamma natural emitida por las rocas que rodean el pozo. Las fuentes naturales más importantes de radiación gamma son el potasio-40 y los productos secundarios de la serie de decaimiento de Uranio y Torio. Las rocas que contienen Arcilla y Lutitas comúnmente emiten radiación Gamma relativamente alta porque incluyen productos de meteorización de feldespato potásico y mica y tienden a concentrar Uranio y Torio mediante absorción e intercambio de Iones. Sirve para determinar contenido de Arcilla y Lutitas.

Registro de Potencial Espontáneo:

El potencial espontáneo registra potenciales o voltajes desarrollados entre el fluido del pozo y las rocas y fluidos circundantes. El registro funciona midiendo

pequeños potenciales eléctricos entre profundidades dentro del pozo y un electrodo conectado a tierra en la superficie. El cambio de voltaje a través del pozo es causado por la acumulación de cargas en las paredes del pozo. Las Arcillas y las Lutitas (que están compuestas predominantemente de arcillas) generarán una carga y las formaciones permeables como la arenisca generan una opuesta. Los potenciales espontáneos se producen cuando dos soluciones acuosas con diferentes concentraciones iónicas se ponen en contacto a través de una membrana porosa semipermeable. Se pueden usar en la determinación de la litología y la calidad del agua.

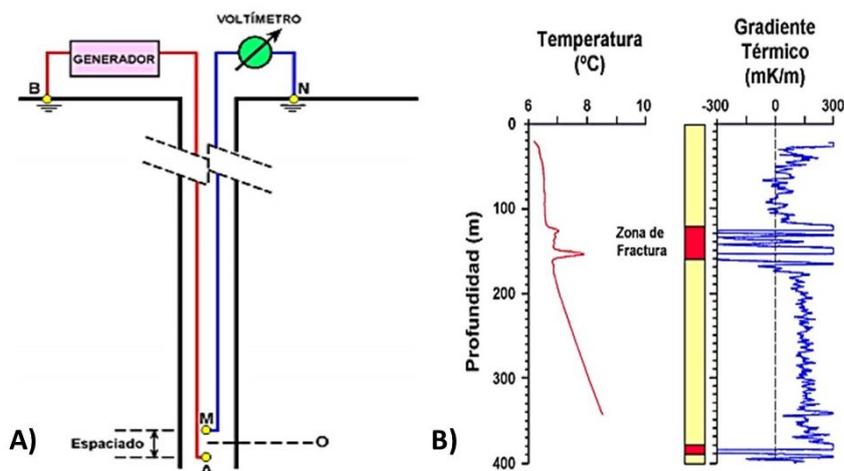


Ilustración 14. A) Diagrama de registro de Resistividad y potencial Espontáneo, B) Esquema del registro de Temperatura. Fuente:

http://caminos.udc.es/info/asiqnaturas/grado_itop/415/pdfs/Tema%2012%20Exploracion%20y%20prospeccion.pdf

Registro de temperatura:

Este registro determina la temperatura del fluido alrededor del sensor de la sonda. Se puede obtener información sobre la fuente y el movimiento del agua y la conductividad térmica de las rocas. Los registros de temperatura también se utilizan para determinar la ubicación de la lechada fuera de la carcasa después de colocar un pozo. La temperatura generalmente aumenta con la profundidad a una velocidad constante (el gradiente geotérmico). Los gradientes geotérmicos varían de un lugar a otro dependiendo de numerosos factores tectónicos, estratigráficos y geoquímicos. El gradiente general no es tan importante en la identificación de estructuras (es decir, fallas y fracturas) como las desviaciones de temperatura.

2.4 HIPÓTESIS

Las condiciones hidrogeológicas de la zona podrían ser las adecuadas para suplir la demanda de agua de calidad para el nuevo proyecto de viviendas populares Bismarck Martínez.

Capítulo 3 DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de Estudio

La investigación realizada es de enfoque **cuantitativo** que, según Hernández Sampieri (2014), es un enfoque secuencial y probatorio, se descubrieron sucesos complejos, en este caso en el medio hidrogeológico con la información recolectada.

El tipo de investigación según análisis y alcance de los resultados de este estudio es del tipo **descriptivo** que investigó características, factores y condición de las variables, sirvió para describir, en muchas de sus componentes la realidad del problema. El diseño de investigación para la recolección, análisis, discusión de resultados y conclusiones es del tipo **transversal**, lo que implicó hacerlo en un solo corte en el tiempo. La investigación se realizó desde el mes de enero hasta octubre del año 2020.

3.2 Área de estudio

- a) Por lo Institucional/Organizacional (**Líneas de investigación UNAN-Managua**)
- Área de conocimiento: Prospección de recursos Naturales.
 - Línea de investigación: Exploración y Explotación de recursos naturales.
 - Tema de interés: Explotación y exploración de agua subterránea.
- b) Por lo geográfico

El área geográfica de estudio corresponde a la zona baja de la Micro Cuenca 3 de la Subcuenca Sur del Lago de Managua, específicamente en los alrededores del Aeropuerto Internacional A. C. Sandino, el área se especifica en la Ilustración 1.

3.3 Universo y Muestra

Universo:

El universo es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones (Selltiz et al., 1980) citado en Hernández Sampieri, (2014). El universo de nuestra investigación corresponde a todo el conjunto de parámetros del medio geológico-hidrogeológico del área de estudio.

La muestra:

Es el subgrupo de la población sobre el cual se aplicarán los métodos para la verificación de la Hipótesis. En este caso corresponde a los materiales litológicos en los que circulan las aguas subterráneas del área de estudio.

3.4 Variables y Operacionalización de variables

Tabla 3.1. Operacionalización de Variables (MOVI)

Objetivo Específico	Definir la Geometría del Acuífero	Establecer la dinámica de flujo del agua subterránea en el acuífero	Evaluar la calidad del agua para consumo humano	Determinar los Parámetros hidráulicos	Definir Las Unidades hidro-estratigráficas
Denominación	La Geometría	La Dinámica de Flujo	La Calidad del Agua	Los Parámetros hidráulicos	Las Unidades hidro-estratigráficas
Tipo	Independiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente	Independiente
Naturaleza	Cuantitativa	Cuantitativa	Cualitativa	Cuantitativa	Cuantitativa
Medición	Intervalo	Intervalo	Ordinal	Intervalo	Intervalo
Indicador	Resistividad	Carga Hidráulica	Parámetros Físico-Químicos y Bacteriológicos.	-Permeabilidad -Transmisividad -Coeficiente de Almacenamiento	-Litología -Transmisividad
Unidad de Medida	Ohm/m	Metro	Varios	K= m/días T= m ² /días	Varios
Instrumento	-Medidor de Resistividad Terrameter ABEM LS	-Sonda para Niveles de agua -GPS	-Diagramas Triangulares. -Análisis Físico-Químico.	-Prueba de Bombeo	Sondas de: -Registro Eléctrico. -Temp. Y conductividad.
Dimensión	Geográfica	Geográfica	Diagnóstica	Física	Geológica
Definición Conceptual	Delimitación de las unidades o capas que contienen agua para su explotación.	Características del flujo de agua subterránea para entender su dirección.	Características físicas, químicas, biológicas del agua. Es una medida de la condición del agua como requisito para el consumo humano.	Parámetros fundamentales para caracterizar los acuíferos. Definen las posibilidades de explotación que tienen los acuíferos.	Zonas con características definidas de las propiedades de cada litología que sirven para clasificar límites espaciales dentro de los acuíferos.

Fuente: elaboración propia

3.5 Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos e información

Un instrumento de medición es aquel que registra datos observables que representan verdaderamente los conceptos o las variables que el investigador tiene en mente (Grinnell, Williams y Unrau, 2009) citados en Hernández Sampieri, (2014). En nuestra investigación como en la mayoría de las investigaciones cuantitativas, aplicamos instrumentos para medir las variables contenidas en la Hipótesis.

La recolección de datos en campo se realizó en áreas, que nos permitieron analizar las características de las variables, estas mediciones se describen en apartados, detallándose en la Tabla 3.2 Tabla .

Tabla 3.2. Métodos e Instrumentos

Área de estudio	Método	Instrumento/Equipo
Hidrogeología-Geología	Medición de Niveles de Agua	Sonda para Niveles de agua
	Medición Multiparámetros en campo	Sonda Multiparamétrica
	Prueba de Infiltración.	-Permeámetro de Guelph
	Geología superficial	-Piqueta -Cinta Métrica -Lupa -GPS -Libreta de Campo
	Descripción de Materiales (durante perforación)	-Ficha para descripción -Lupa -Cinta Métrica -GPS
Geofísica	Tomografía Eléctrica	Terrameter ABEM LS
	Registro Eléctrico de pozo	Sonda de Registro eléctrico

Fuente: elaboración propia

Estudios de Hidrogeología – Geología:

Se realizaron varias actuaciones, las que tienen que complementarse con instrumentos de medición específicos que se describirán a continuación:

- En la medición de los niveles de agua subterránea y la recolección hidrogeológica, los que fueron utilizados para determinar el Nivel freático, dirección y velocidad del flujo subterráneo, se operó una Sonda para medir el Nivel Estático, la que cuenta con las siguientes características:

Tabla 3.3. Características Sonda Nivel Estático.

Eléctricas:	Mecánicas:
Voltaje: Batería de 9V	Material: acero inoxidable (estación) y latón cromado (sonda).
Duración de la Batería: 1 mes de uso diario (aproximadamente)	Dimensiones: $\Phi 15 \times 195$ mm (sonda).
	Peso: 40 Lb con cinta métrica de 300 m (aproximadamente).

Fuente: elaboración propia según manual del equipo.

- Los parámetros físico-químicos fueron medidos con una sonda Multiparamétrica de marca Milwaukee con las características técnicas de la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Características sonda Multiparamétrica

- pH	Intervalo: pH 0.00 a 14.00 Resolución: pH 0.01 Exactitud: pH ± 0.05
-Conductividad	Intervalo 0 a 3999 $\mu\text{S/cm}$ Resolución 1 $\mu\text{S/cm}$ Exactitud F. S. $\pm 2\%$
-TDS	Intervalo 0 a 2000 mg/L (ppm) Resolución 1 mg/L (ppm) Exactitud F. S. $\pm 2\%$
Temperatura	Intervalo 0.0 a 60.0 $^{\circ}\text{C}$ / 32.0 a 140.0 $^{\circ}\text{F}$ Resolución 0.1 $^{\circ}\text{C}$ / 0.1 $^{\circ}\text{F}$ Exactitud ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$ / ± 1 $^{\circ}\text{F}$

Fuente: elaboración propia según manual del equipo.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

- Prueba de Infiltración: la prueba de infiltración se realizó con el objetivo de medir capacidades del suelo para posterior calcular parámetros como la permeabilidad (k) y la capacidad de infiltración (I), todo esto con el propósito de conocer el agua que ingresa al acuífero. Para esta prueba se usó un Permeámetro de Guelph, sus características son:

Tabla 3.5. Características Permeámetro de Guelph

-Diámetro del Barreno de Corte: 6 cm	-Rango de Profundidad: 15 – 75 cm (con tubos extensores)
-Rango de Altura de Pozo: 75 cm	-Capacidad del Contenedor de Agua: 11.36 L
-Rango de Conductividad Hidráulica: 10e4 a 10e7 m/Seg	-Capacidad máxima del Permeámetro; 3.8 L

Fuente: elaboración propia según el manual del equipo

El agua subterránea está contenida en y se mueve a través de las formaciones geológicas. Por tanto, para realizar cualquier estudio relacionado con el agua subterránea, es necesario el conocimiento básico de la geología. Los métodos e instrumentos geológicos se describen a continuación:

- Geología Superficial: que comprende un análisis de las características geológicas de la zona; tipo de roca, sus propiedades y la estructura o disposición de los materiales. Se utilizó libreta de campo, piqueta, Cinta métrica, Lupa y GPS.

Estudios de Geofísica:

- Resistividad eléctrica: se obtuvieron mediante Tomografías de Resistividad Eléctrica, con el equipo Terrameter LS marca ABEM con las siguientes características:
- Registro eléctrico de pozo: es una técnica usada para medidas petrofísicas en pozos. Para este estudio se utilizará un equipo de Robertson Geologging Ltd. Este equipo consiste de a) un registrador de datos (data logger), b) Robertson Micro Logger, c) dos cables de medidas y c) sondas que pueden medir uno o más parámetros. Los datos son recolectados continuamente en la PC conectada al registrador de datos.

Además de un d) Malacate o elevador: una unidad robusta de 500m que se operó desde un vehículo a baterías.

Tabla 3.6. Características Medidor de Resistividad

Eléctricas:	Mecánicas:
-GPS	-Estuche de aluminio corrugado
-Capacidad de memoria (4GB)	-Computadora integrada
-Energía (Pack de baterías internas de 12V)	-Pantalla tipo TFT LCD, a colores.
-Rango de Temperatura (-20 °C a + 70 °C funcionando)	
-Rango de voltaje de entrada (+/- 600 V)	
-Entrada de impedancia (200 MΩ y 20 MΩ)	
-Potencia de Salida (250 W)	
-Máximo de corriente de salida (2500 mA)	

Fuente: elaboración propia según manual del equipo.

Las sondas que se utilizaron fueron:

a. Sonda eléctrica con las Características:

Tabla 3.7. Características Sonda Eléctrica

Mediciones:	Especificaciones:
Resistividad	Diámetro: 45mm
Single-point resistivity	Longitud: 2,75m
Self-potential (SP)	Peso: 11kg
Natural – Gamma	Temperatura: 0-70°C
Fluid Temperature	Máx presión: 20 Mpa
	Rango de Resistividad: 1 a 10,000 ohm-m

Fuente: elaboración propia según manual del equipo.

b. Sonda de Temperatura-Conductividad con las siguientes características:

3.6 Procedimientos para la recolección de datos e información

La metodología que se siguió en el estudio fue en 3 etapas que se describen a continuación:

1) Trabajo de Gabinete:

En esta etapa se recopiló y analizó toda la información posible del área y se prepararon las condiciones para proceder a la etapa de campo, siendo las siguientes:

- Recopilación de información:

En esta etapa se consultaron investigaciones, tesis y otros estudios realizados en las cercanías al área de estudio, nacionales e internacionales, mapas topográficos, geológicos, imágenes satelitales, fotografías aéreas de todo Managua a escala 1: 40,000.

- Síntesis de las características Geomorfológicas y Geológicas:

Se hizo una revisión bibliográfica con el objetivo de reconocer las características Geomorfológicas y Geológicas de la zona de las principales unidades litológicas identificadas en estudios anteriores.

- Estudio de las características climáticas:

Se realizó una caracterización del clima de la zona con parámetros obtenidos en la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional A.C. S. propiedad del INETER de 11 años (2007-2018), con el objetivo de conocer las condiciones climáticas de la zona.

- Paralelo a estas actividades, se elaboró el protocolo de investigación.

2) Etapas de campo:

En esta etapa se desarrolló el levantamiento de datos para la caracterización de las variables de investigación en distintas etapas de estudio:

- **Inventario de Pozos:** primeramente, se recopiló el mayor número de datos sobre los pozos y en el área de estudio, con el objetivo de realizar el *Mapa Piezométrico*, fue la primera etapa del trabajo, los puntos de agua que se visitaron incluyen: pozos excavados, pozos perforados y, se visitaron cada uno de estos puntos para recolectar información suficiente del medio físico como:

Tabla 3.8. Datos a recolectar en inventario de Pozos

Coordenadas de la captación (X, Y, Z)	Cota del nivel del terreno
Profundidad del nivel del agua	Características técnicas de la perforación
Profundidad del nivel del pozo	Diseño de la captación y uso

Fuente: elaboración propia

Los niveles de agua subterránea se midieron de forma manual con la sonda de nivel.

Se tomaron muestras de agua en el pozo exploratorio para su análisis en laboratorio de absorción atómica, físico-químicos y bacteriológicos.

- **Prueba de Infiltración con permeámetro de Guelph:** Se realizaron cuatro pruebas de infiltración de Guelph, la metodología consistió en hacer infiltrar agua hasta saturar la porción de suelo donde se hizo la perforación con el barreno manual, midiéndose cada minuto el nivel del agua en la escala de Cabeza del Pozo. El procedimiento de campo se resume en:
 - a. Elección del sitio para realizar la prueba.
 - b. Montaje del Permeámetro.
 - c. Colocación del trípode y el Permeámetro.
 - d. Llenado de agua.
 - e. Inicio de la prueba.
 - f. Cálculo de la permeabilidad (K) y la capacidad de infiltración (I) con los datos obtenidos para realizar el balance hídrico de suelos.

- Se realizó un **reconocimiento superficial geológico** con el objetivo de descripción litológica y estructural de los afloramientos rocosos en la zona de estudio, comprobando las litologías propuestas por los mapas oficiales, además de un análisis estructural para entender la dinámica de la tectónica local.

La metodología consistió en la descripción de las características geológicas de las zonas visitadas para hacer una correlación y análisis. La metodología en campo fue:

- a. Selección de los puntos favorables (con buenos afloramientos)
- b. Georreferenciación del punto (X, Y, Z)
- c. Descripción de la morfología local
- d. Descripción litológica
- e. Descripción estructural

La manera de recolección de datos se hizo por medio de campañas de reconocimientos puntuales en los sitios y se procedió a la descripción de los materiales.

- **Perforación de un pozo exploratorio:**

- El pozo exploratorio se hizo con el objetivo de confirmar el recurso y las características geológicas en profundidad y así definir con mayor precisión y veracidad la estratigrafía de la zona perforada mediante descripción macroscópica de los recortes de la barrena y los datos obtenidos de la Sonda eléctrica, se reconocieron también con esta, la conductividad eléctrica y temperatura.
- También, se hizo un análisis de las propiedades físico-químicas y bacteriológicas para efectuar un análisis de la calidad del agua mientras el pozo exploratorio descendió.
- El la perforación de este pozo inició en mayo y terminó en septiembre, fecha cuando se hicieron los estudios en el.

- **Tomografías eléctricas:** se realizó con el objetivo de interpretar los distintos materiales del subsuelo, a partir de variaciones de la resistividad al paso de la corriente eléctrica.

La metodología de campo fue:

- a. Apertura de carriles sobre los que se realizaron las tomografías eléctricas.
- b. Ubicación de los electrodos y cables de corriente.
- c. Posteriormente instalación de los cables se conectaron los electrodos al cable, amarre con el cable siguiente y así hasta tener todos los cables empalmados.
- d. Realización del levantamiento eléctrico.

La manera de recolección de datos para tomografías eléctricas fue mediante 2 perfiles de 800, un perfil de 600 m y un último de perfil de 520 m, (Ilustración 15) con separación entre electrodos de 10 metros, utilizando el arreglo electródico de gradiente, alcanzando de 110-150 metros de profundidad. Los perfiles de resistividad, tomografía eléctrica 2D, se tomaron

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

utilizando el arreglo multielectrónico Gradient XL, con el equipo Terrameter LS marca ABEM.



Ilustración 15. Ubicación de los perfiles Geoelectrónicos más ubicación del pozo exploratorio.

La dirección de los perfiles se definió para longitudes con las que se obtuviera la mayor información del área, y para obtener una profundidad mayor a 100 m puesto que el pozo exploratorio se iba a perforar hasta 91.44 m de profundidad. Todo esto se logró con dos perfiles paralelos en dirección N-S de 800 m y dos perfiles en dirección NW-SE con 520 y 620 m de longitud respectivamente.

- **Registro Geofísico de pozo:** se midieron parámetros físicos de las formaciones geológicas y del agua mientras la perforación del pozo exploratorio descendió.

Al final de la etapa de perforación, se llevó a cabo la adquisición de registros geofísicos de pozo. Los registros que fueron tomados son: potencial natural (SP), rayos gamma naturales (GR), eléctrico normal largo (64"), normal corto (16") y lateral (Lat), además de la resistividad puntual y la temperatura. La metodología fue:

- a. Sacar todos los materiales de perforación.
- b. Extraer agua por un tiempo con el objetivo de limpiar.
- c. Armar el trípode para la sonda
- d. Introducir la sonda
- e. Encender el equipo y empezar con las mediciones
- f. Análisis de los datos

3) **Análisis de los resultados que se describe a continuación:**

3.7 Plan de análisis y procesamiento de datos

Los resultados obtenidos de la campaña de campo fueron analizados para presentarse en los resultados, para eso se hizo el siguiente plan de análisis y procesamiento de los datos:

1) Análisis y procesamiento de datos Hidrogeológicos:

Los datos recolectados en la campaña hidrogeológica se analizaron en softwares especializados para cada caso:

- A. Realización del mapa piezométrico: los datos puntuales de las cargas hidráulicas recolectadas fueron analizados con procesos geoestadísticos para definir Isolíneas que representen estos niveles de agua subterránea para determinar la dirección del flujo subterráneo, el software que se utilizó fue ArcGIS de ESRI en la versión 10.5. El procedimiento se resume en:
 - a. Búsqueda de información previa.
 - b. Recolección de datos en campo.
 - c. Creación de Base de datos con atributos espaciales y cálculo cargas hidráulicas en Microsoft Excel.
 - d. Creación de Shapefile de puntos en ArcGIS 10.5.
 - e. Tratado geoestadístico de los datos y selección del tipo de interpolación.
 - f. Interpolación de los datos por el método Kriging
 - g. Extraer curvas con la herramienta de geoprocésamiento 3D analys toolbar, contour.
 - h. Diseñar características cartográficas del mapa, revisión y presentación.
- B. Análisis de las pruebas físico – químicas y bacteriológicas: Se realizó interpretación de la calidad de agua de acuerdo a los parámetros propuestos en la NTON 05 007- 98 (Publicado en La Gaceta N° 30 el 11 de febrero del 2000), para Aguas del “Tipo 1” y sus niveles mínimos de

calidad. Estos criterios han sido establecidos como guías para alcanzar niveles de seguridad en la contaminación del agua a nivel nacional, con el objetivo que se garantice la seguridad humana. El procedimiento se resume en:

- a. Recolección de muestras de agua en campo.
- b. Análisis en laboratorio.
- c. Interpretación de los datos obtenidos.
- d. Caracterización de aguas.
- e. Conclusiones.

Para determinar el carácter agresivo e incrustante del agua en función de la temperatura, pH, dureza, alcalinidad y sólidos disueltos, se ha analizado el índice el de Langelier (IL). A través de este índice se define la agresividad del agua con respecto al carbonato de calcio (CaCO_3). Está basado en el efecto del pH sobre el equilibrio de solubilidad de CaCO_3 . El pH, al cual el agua está saturada con CaCO_3 , es conocido como pH de saturación (pH_s). Langelier define un índice (IL) igual a la diferencia entre el valor medido del pH del agua y el del pH de saturación (De Sousa, et al., 2010):

$$I_L = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (13)$$

$$\text{pH}_s = 11.017 + 0.197 \log(\text{SDT}) - 0.995 \log(\text{Ca}^{+2}_T - 0.016 \log(\text{Mg}^{+2})_T - 0.041 \log(\text{Alcalinidad})_T + 0.021 \log(\text{SO}^{-2}_4)_T)$$

Donde:

- I_L = Índice de Saturación de Langelier [Adim]
- pH = pH medido del agua [Adm]
- pH_s = pH del sistema saturado con CaCO_3 en el valor medido de calcio y alcalinidad [Adm]
- SDT = Sólidos Totales Disueltos, T denota la concentración analítica total en mg/L
- **Si $I_L > 0$** , el agua está sobresaturada, el CaCO_3 se deposita, por lo tanto, el agua es incrustante.
- **Si $I_L = 0$** , el agua está saturada (en equilibrio) con CaCO_3 , éste ni se precipita ni se disuelve.
- **Si $I_L < 0$** , el agua está insaturada, el CaCO_3 tiende a disolverse por lo tanto el agua es agresiva (Varo Galvañ et al., 2004).

C. Balance hídrico de suelos

Con el objetivo de cuantificar las entradas al sistema acuífero para realizar un análisis del agua subterránea disponible y proponer una inventiva del aprovechamiento sostenible, fue necesario el realizar un balance hídrico en la

zona, que describa la cantidad de agua que es capaz de recibir anualmente el acuífero. Se planteó realizar la metodología propuesta por Schosinsky, (2006) para Centro América.

Este Balance analiza la Recarga Potencial para un área de 1m² de superficie con la profundidad de las raíces del tipo de plantas que se encuentra en la zona. Para el cálculo de recarga anual se ha tomado como referencia el área considerada para el tubo de flujo (Ilustración 30), el área de estudio, como se muestra en el mapa geológico (Ilustración 17) corresponde a una misma unidad litológica, que son suelos Aluviales, por lo tanto, la infiltración será considerada como homogénea, cabe destacar que no han sido tomadas en cuenta las áreas antrópicas que impermeabilizan el suelo.

La estación meteorológica que se utilizó corresponde a la que se encuentra en el Aeropuerto Internacional A. C. S., bajo supervisión de INETER, los datos para el análisis fueron entre los años 2007 a 2018, esta estación se encuentra dentro del área antes mencionada.

D. Cálculo de Caudal de flujo: con los datos obtenidos de las conductividades hidráulicas derivadas de las pruebas de bombeo se realizó un cálculo de la cantidad volumétrica de agua subterránea que pasa por una sección transversal a la dirección del flujo subterráneo. Para calcular el caudal se aplicó la ley de Darcy.

E. Balance General de Aguas Subterráneas

Con el objetivo de conocer el almacenamiento, salidas y entradas, para estar al tanto del volumen de agua que es capaz de ser extraída, se realizó un Balance General de las Aguas Subterráneas de la zona. Este tipo de Balances han sido utilizados con anterioridad en acuíferos para registrar las componentes de salida, entrada y la cantidad almacenada (Voudouris, 2006). La ecuación que se utilizó fue la ecuación general del Balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de Almacenamiento} \quad (14)$$

Para este balance fue necesario cuantificar las componentes de entrada y salidas del sistema acuífero en el área de estudio. La cuantificación se llevó a cabo por medio de la estimación de los excedentes al acuífero por medio de un balance hídrico de suelos, que tienen especial utilidad para determinar la recarga de acuíferos (Rodríguez, 2013).

- **Análisis de Pruebas de Bombeo:** se realizó un análisis de la prueba de bombeo realizadas en un pozo cercano al área de estudio (Pozo UNA-ENACAL en 2004) por ENACAL con el objetivo de calcular los parámetros hidráulicos del acuífero, y para proporcionar datos necesarios para determinar la capacidad de explotación del acuífero.

En la prueba de bombeo se bombeó agua durante 24 horas seguidas, una a caudal constante y otra de igual tiempo a caudal variable, mientras se bombeaba, se monitoreó el nivel del agua en el mismo pozo con el objetivo de verificar descensos del nivel freático.

- 2) **Análisis y procesamiento de datos geológicos:** Los datos recolectados en campo fueron analizados y representados mediante técnicas geológicas estándar. Los análisis de las litologías se representan por medio de columnas lito-estratigráficas que son generadas en el programa Golden software Strater en la versión 5.4.

El Mapa Geomorfológico y Geológico (Ilustración 16 e Ilustración 17 respectivamente) se elaboraron desde la información publicada por fuentes oficiales. Para la información Topográfica se utilizaron mapas Topográficos publicados por INETER-JICA, (2006) con los que se delimitaron las redes de drenaje. Con el objetivo de representar en forma continua la distribución espacial de la elevación de la superficie del terreno y hacer el cálculo de algunas características de alturas y pendientes, se utilizó un Modelo Digital de Elevaciones con resolución de 12.5 x 12.5 metros que cubre el área de Managua, dicho modelo fue obtenido desde los servidores de Alaska Satellite Facility (ASF) con información proveniente de la misión ALOS (Advanced Land Observation Satellite). A partir de este material se generaron curvas de nivel y se hizo análisis Geomorfológico, (sección geomorfología) en el que pudieron observar las estructuras descritas por la bibliografía.

El Mapa estructural Ilustración 20, se realizó en base a la publicación del “Mapa de Fallas Geológicas de Managua” en el marco del proyecto “Fortalecimiento de las Capacidades de Preparación y Respuesta en las Áreas Urbanas del Distrito IV de Managua, Nicaragua” ejecutado por la Cruz Roja Española, Cruz Roja Italiana y Cruz Roja Holandesa en el marco del VII Plan de Acción DIPECHO en conjunto con INETER en 2012.

3) Análisis y procesamiento de datos geofísicos:

A partir de los datos obtenidos por el Terrameter LS, se calculó un modelo de resistividad bidimensional mediante el software de inversión RES2DINV. Este método de inversión intenta crear un modelo de resistividad del subsuelo que corresponde a los datos de resistividad aparente medidos (Loke, 1999).

La interpretación del registro se llevó a cabo siguiendo los valores de resistividad del registro eléctrico y la separación de las curvas con diferente grado de profundidad de investigación (zona lavada, zona de transición y la zona no invadida) para identificar zonas permeables e impermeables según la penetración del lodo de perforación. Para distinguir los diferentes espesores de las formaciones se utilizaron los valores de resistividad, el comportamiento

de la curva del registro eléctrico y los registros de rayos gamma y potencial natural que son indicativos de la presencia o ausencia de arcillas.

4) Modelo conceptual Hidrogeológico:

Se realizó con todos los datos recolectados y analizados un modelo Conceptual de la zona estudiada, con el objetivo de contextualizar y visualizar el escenario físico y su comportamiento, dicho modelo integra características Hidrogeológicas, Geológicas y Geofísicas. El modelo contiene los siguientes elementos representados en un perfil y una vista tridimensional del subsuelo.

- La geometría del acuífero, área y rangos de profundidades.
- Unidades hidro-estratigráficas.
- Niveles del agua subterránea y gradiente.
- Direcciones del flujo de agua subterránea.

Tabla 3.9. Softwares Utilizados

Nombre	Empresa	Aplicación
ArcGis 10.5	ESRI	Creación de diferentes tipos de mapas y geo-procesamientos.
Strater	Golden Software	Representación en 2D de las litologías.
Winlogger	Robertson GEO	Registrar datos del Sondeo y exportarlos
RES2DINV	GEOTOMO Software	Invierte los datos de resistividad aparente a datos de resistividad en 2D.
R Software	Software libre	Procesamiento de datos y creación de gráficos.

Fuente: elaboración propia

Capítulo 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis y comprobación de la Geomorfología y Geología local

Como parte de este estudio se llevó a cabo una revisión de la bibliografía que comprende la geomorfología y geología del área, con el objetivo de generar una síntesis de las características superficiales de la zona, además se realizó un reconocimiento en campo para comprobar estos recursos. Se analizaron estudios existentes, interpretaciones de imágenes satelitales y el reconocimiento antes mencionado para realizar mapas que muestren estas características.

Rasgos geomorfológicos generales

La detección de anomalías en la morfología del relieve permite a menudo determinar y caracterizar la existencia de tectónica reciente. El área de estudio corresponde a la parte Oriental de Managua, lo que tectónicamente corresponde con el Graben Aeropuerto. Está limitado al Norte con el lago de Managua (45 m.s.n.m aprox.) (Ilustración 4), y al sur por la estructura cratérica del complejo del volcán Masaya.

Toda la parte central de este sistema de Graben está sobre una depresión aluvial entre las cotas (40-100 m.s.n.m) con una pendiente media de (2.3%). Hay estructuras tectónicas en la zona, representadas por escarpes, la principal es la que describe Tellez, (2011) como sistema de fallas Cofradía, que cuenta con unos 100 metros de altitud (Cowan, 2002) y una longitud de unos 37 km, se extiende desde el complejo volcánico Masaya en el Sur, pasando por el lago de Managua y en el Norte con el pueblo San Benito (Tellez, 2011); la falla Aeropuerto conforma el límite Occidental del Graben, con altura promedio de 4 a 6 m (Woodward, 1975), se extiende desde el Aeropuerto Internacional A.C Sandino, hasta debajo del Lago como demostró (Funk et al., 2008) por medio de trabajos de sismica de reflexión de alta resolución (Ilustración 4).

La zona de estudio corresponde a lo que clasificó Jiří Šebesta, (2006) y como se pudo comprobar por medio de la campaña de campo, es una planicie volcánica fluvial (8 en la Ilustración 16), lo que se traduce como una zona de transporte y deposición de sedimentos, esto dado a sus características de relieve, todos estos materiales son depositados por procesos superficiales de carácter hidrológico y de algunas actividades agrícolas sectorizadas.

Al sul del área de estudio, como se muestra en la Ilustración 16 afloran Superficies estructurales de Lavas Jóvenes (2), corresponde a flujos de Lavas del Cuaternario expulsadas por el Volcán Santiago, de la caldera Masaya. Mientras que al Este y Oeste del área de estudio se extienden afloramientos de Flujos piroclásticos de Erupciones Recientes (5).

Morfológicamente el área está representada en el Sureste , principalmente, por Colapsos Estructurales y del Relieve, estos Colapsos podrían estar asociados con el tectonismo activo del Graben de Managua (Girard, 2005). Y de Escarpes Expresivos de Formas Volcánicas (ES) al Sur, estos escarpes están asociados con la Caldera Las Sierras (Ilustración 16).

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

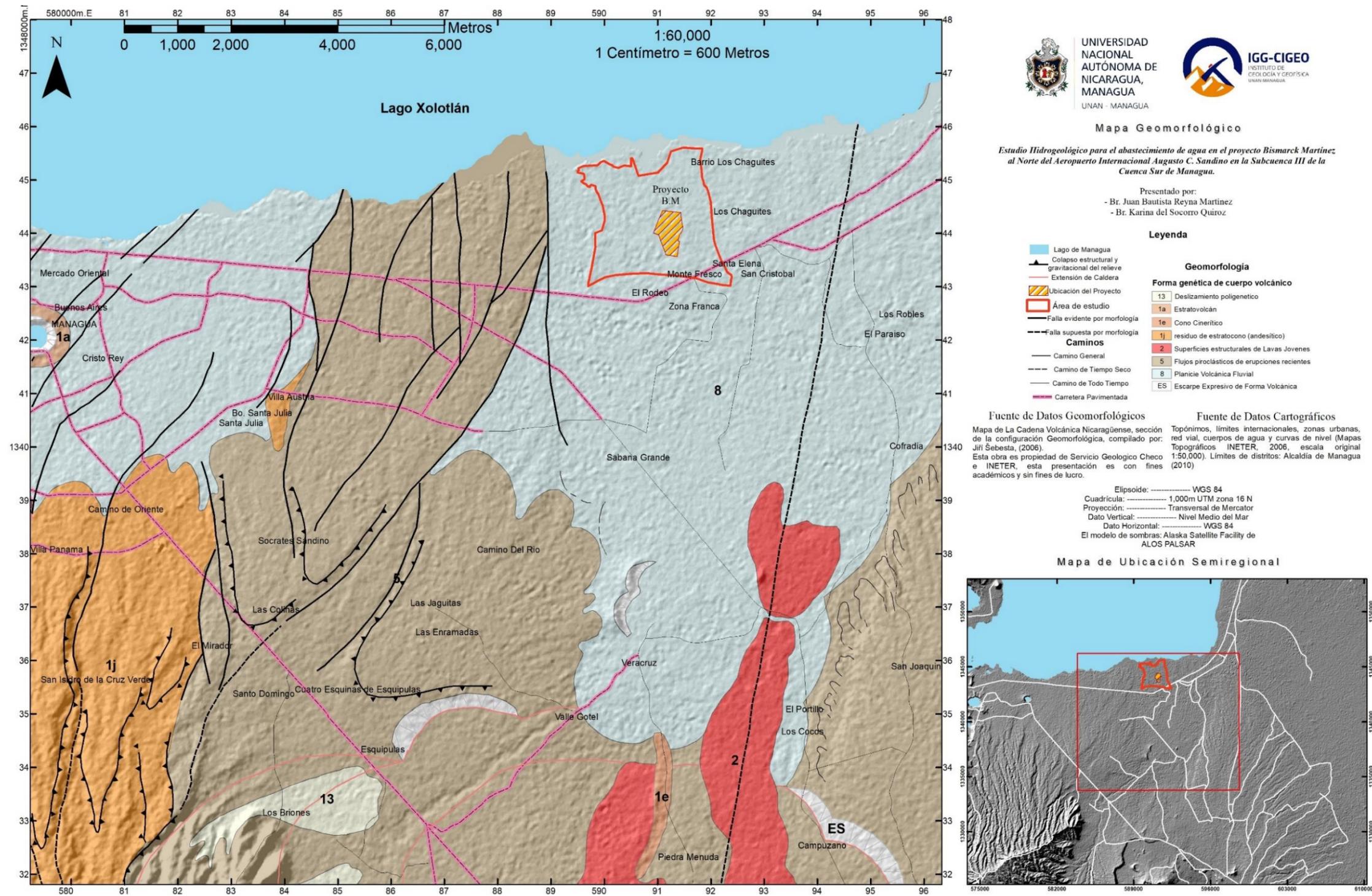


Ilustración 16. Mapa Geomorfológico del área de estudio. Fuente: Jiří Šebesta-INETER, (2006).

Geología general del área

La zona corresponde lo que se describió inicialmente por McBirney, (1965) como la Provincia Geológica de la Depresión que abarca todos los materiales en el Graben de Nicaragua y el Graben de Managua, los materiales corresponden a parte del Grupo Coyol y formación Tamarindo dentro del Graben, materiales volcánicos del Pleistoceno, Holoceno y del Cuaternario. El sector Este del Graben de Managua, correspondiente al Intra-Graben Aeropuerto, cuenta con materiales descritos por INETER y CGS (2003), es una zona amplia de transporte y deposición de sedimentos por sus características morfológicas, relieve bajo que está sujeto a la remoción y transporte de materiales de cubierta por las características hidrológicas (Ilustración 16).

El mapa geológico (Ilustración 17), se realizó con el trabajo que realizó INETER con el Servicio Geológico Checo (CGS), en el área de Managua entre 1997 y 2003; como parte de la colaboración, Hradecky, (1997) en su trabajo identificó y describió varios grupos estratigráficos en el área. Esta última publicación no comprende la descripción de depósitos individuales de Tefras como se hace en trabajos más recientes. Como resultado de estos trabajos, se confeccionó la “Base Geológica de Managua y sus Alrededores a escala 1:50,000” que fue basado principalmente en estos resultados más la Geodatabase SIG de Georiesgos de INETER, (2003). Presentaron un “Mapa Geológico preliminar del Área de Managua y sus Alrededores a escala 1:50,000”, posteriormente INETER en colaboración con la BGR presentaron el “Mapa Geológico del Área de Managua y sus Alrededores a escala 1:50,000” con algunas correcciones y en el que también incluye información tectónica.

Estos materiales fueron comprobados en un Reconocimiento Geológico Superficial realizado en esta investigación en un área aproximada de 10 Km², que corresponde al área de estudio (Ilustración 1) y extendiéndose al Sur hasta la vecindad de Sabana Grande, al Oeste con los Barrios Unidad de Propósito, Las Américas 2 y Camilo Chamorro, cubriendo también desde las costas del Lago de Xolotlán.

Geológicamente la superficie del área de estudio se comporta de la siguiente manera (INETER, 2003; más éste estudio): La zona donde se realizó el reconocimiento Geológico se encuentra descansando sobre materiales Aluviales y Materiales de cubierta o recientes (Color Amarillo en la Ilustración 17), por las condiciones morfológicas, que corresponden a la parte baja de Intra-Graben, dichos materiales se encuentran expuestos en cauces cercanos, son sedimentos arenáceos finos, arcillas y limos con clastos de materiales Tobáceos de hasta 5 cm de diámetro y fragmentos de Lavas.

Al Este y Oeste (Ilustración 17) del área de estudio afloran materiales volcánicos cuaternarios que INETER, (2003) clasifica como Tobas, Pómez y Escorias. En el reconocimiento geológico realizado para este estudio se pudieron comprobar dichos materiales en afloramientos típicos encontrados al SO del área de estudio (X=589067 m, Y=1343466 m), en una zona de cantera donde anteriormente se explotaban. Se definen como materiales de coloración que varían desde Gris claro a Gris oscuro, su composición es mayormente de cenizas compactas, aunque también hay presencia de materiales basálticos. Tiene fracturas rellenas con carbonato de calcio.

Al Sur, en el área de Veracruz, afloran Escorias (INETER, 2003) que se caracterizan por tener finas capas, compuesta por escoria y ceniza (Morado en la Ilustración 17). Más al Oeste, se encuentran alorando materiales Basálticos (Lila en la Ilustración 17) provenientes de erupciones fluidas del Cráter Santiago.

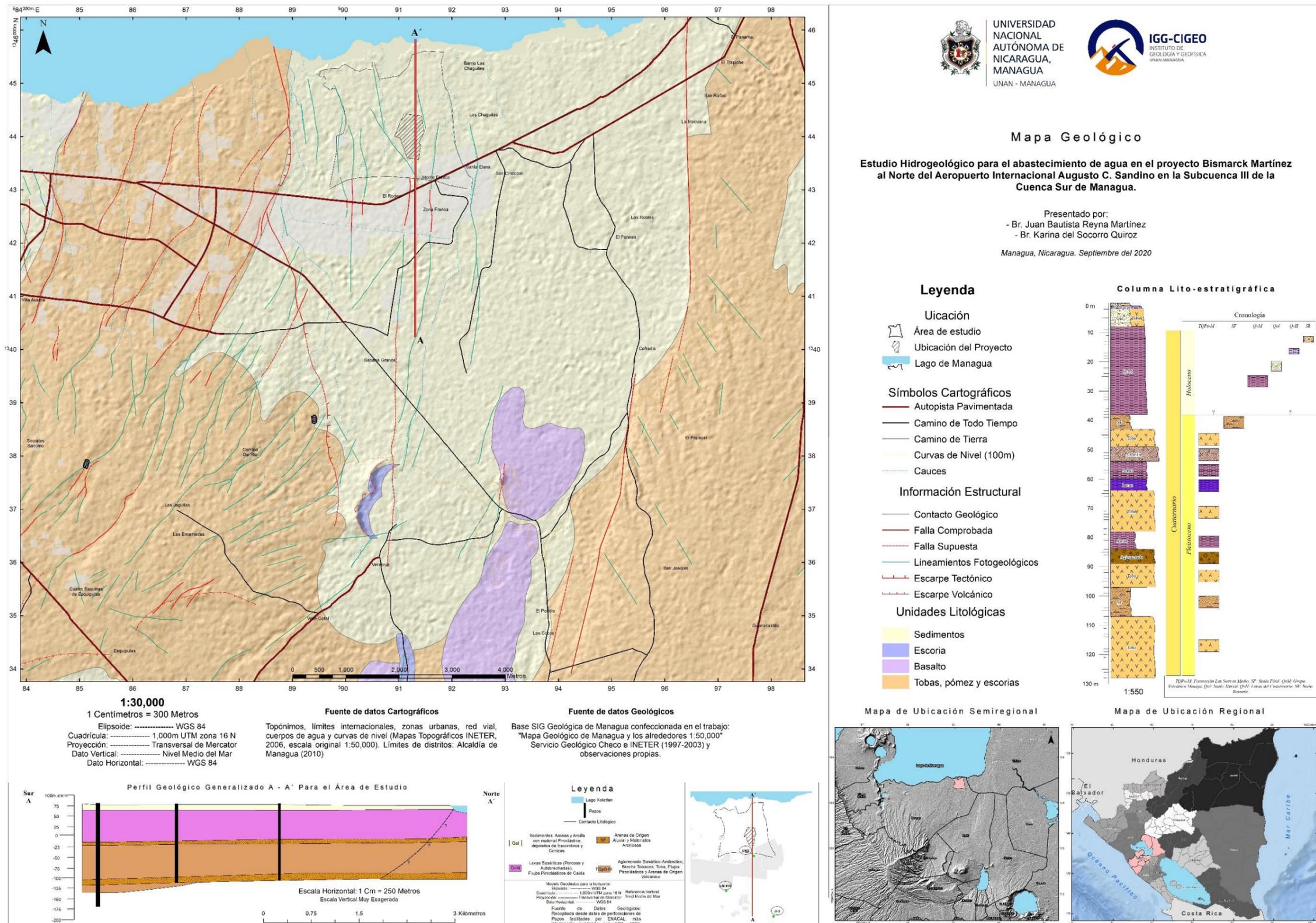


Ilustración 17 Mapa Geológico

Correlación estratigráfica entre los pozos del área de estudio

Partiendo de la información publicada por JICA, (1993) e información facilitada por ENACAL de descripciones de materiales de barreno al momento de la perforación de pozos, se hizo una correlación estratigráfica entre los mismos (Ilustración 18), la línea que se siguió fue la que propuso JICA, (1993), agrupando todos los materiales de composición, textura y color similar como grupos estratigráficos.

Este mismo autor, para el pozo exploratorio JI-3 en el sector de Sabana Grande, asocia los materiales Tobáceos, Arenas, Grabas y Aglomerados como Grupo Las Sierras Medio y a los materiales volcánicos basálticos superiores como Grupo Volcánico Masaya, estas descripciones fueron descritas a profundidades semejantes en los pozos facilitados por ENACAL, Las Mercedes #18 y el pozo UNA-ENACAL. La Ilustración 18 muestra la correlación de los materiales encontrados por JICA, (1993) extendiéndose hacia el Norte, y perdiendo potencia, esto posiblemente a causa de la lejanía de los centros volcánicos con los que en ese estudio asocian su génesis.

Todos los materiales descritos más adelante como la estratigrafía del presente estudio, siguiendo la línea propuesta por JICA, (1993), podrían ser correlacionados con las investigaciones desarrolladas por Kutterolf et al (2007), Pardo et al. (2008) y Avellán (2009), más recientemente. Estos autores sugieren el uso de Formación Las Sierras como la expresión adecuada para este grupo de materiales volcánicos, razón por la cual en esta investigación se empleará dicho término.

En la sección posterior (Estratigrafía) se propone, una columna estratigráfica (Ilustración 19) para las capas que se comportan como acuífero en la zona, la parte basal corresponde a lo que inicialmente JICA, (1993) nombró como Grupo Las Sierras, en el presente estudio, se les asigna el nombre de Formación Las Sierras.

La Formación Las Sierras Medio (TQpS-M) dentro del área de estudio es correlacionada por similitudes composicionales, texturales y de coloración con la parte basal del estudio de Kutterolf et al (2007), quien describe esta formación como dos capas de Tefras Basalto-Andesítica, la Tefra Fontana y la Tefra Dacítica Unicit; y lo descrito con anterioridad por Kuang, 1971 y Woodward, 1965 como una agrupación de depósitos piroclásticos compactos como Tobas y Aglomerados. Los materiales descritos por estos autores en la parte basal son de composición predominantemente ácidas y en la parte superior son básicas.

A menos profundidad se encuentran materiales basálticos, granulares, de origen volcánico, asociados en este estudio con flujos lávicos, estos materiales han sido nombrados, también siguiendo la línea propuesta por JICA, (1993), como Grupo Volcánico Masaya. Este grupo podría ser correlacionado con todas las unidades Cuaternarias desde la época del Holoceno. Todas estas unidades podrían ser las derivadas por los complejos Volcánicos de Masaya, Chiltepe, Asososca y Nejapa mencionados recientemente en la estratigrafía de Managua por Kutterolf et al (2007) y Avellán (2009).

Separando a estas formaciones estratigráficas se encuentran Suelos Fósiles que son descritos como materiales aluviales y arcillosos de coloración café divide a la mitad a la Formación Las Sierras Medio (Ilustración 19).

Más superficial, separando a la Formación Las Sierras Medio y el Grupo Volcánico Masaya se encuentra otro material arenáceo de origen aluvial, estos materiales, han sido clasificados en este estudio como Suelos Fósiles que están demostrando una discordancia en la sucesión de la actividad volcánica, el primer hiato, y el más marcado debido a su potencia, divide a la Formación Las Sierras como se expresó anteriormente, el segundo marca el cambio desde esta Formación con el Grupo Volcánico Masaya (Ilustración 18).

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

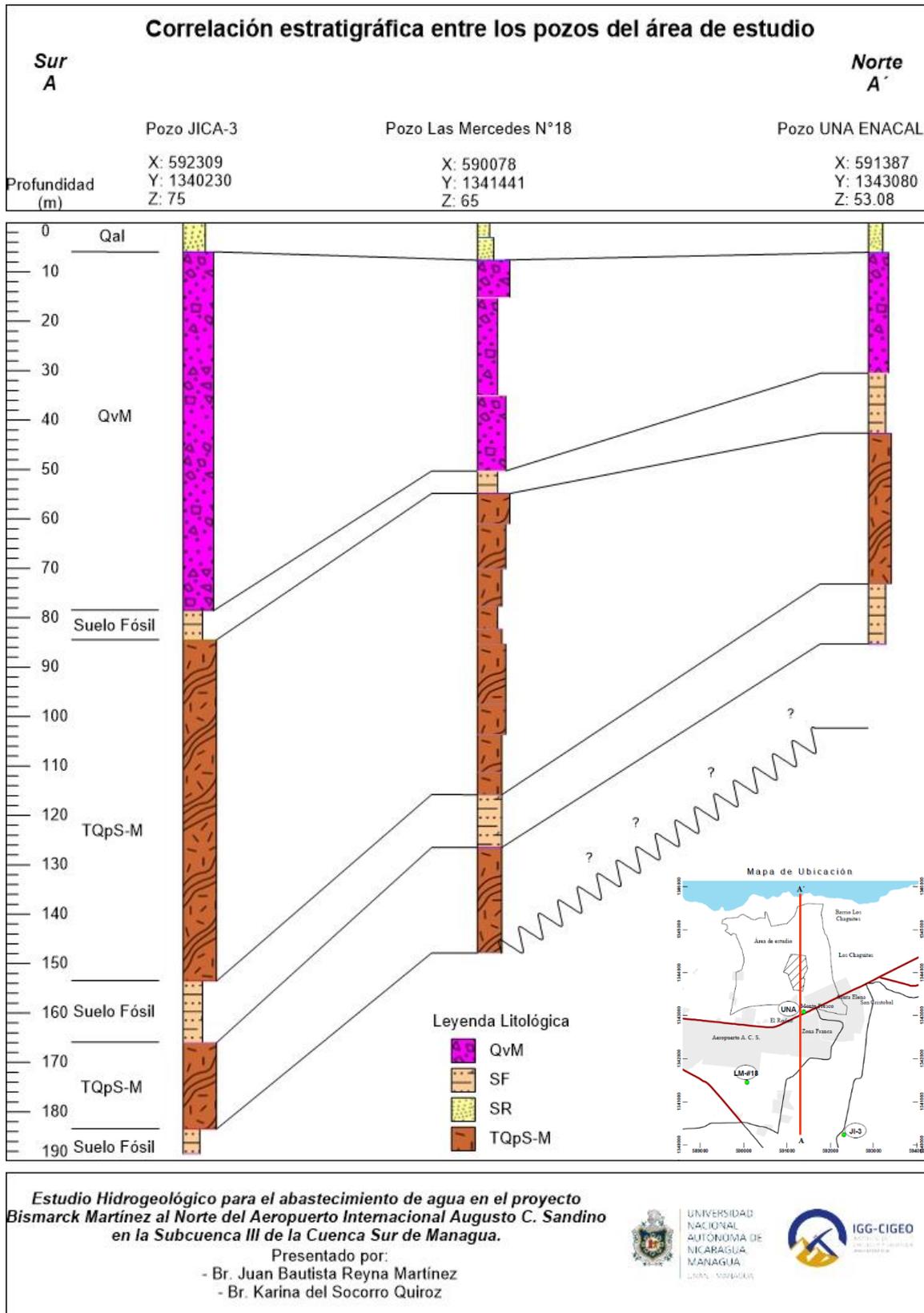


Ilustración 18. Correlación Estratigráfica entre los Pozos. Fuente: Elaboración propia

Estratigrafía

El presente estudio está basado en la división realizada por Kutterolf et al (2007), Pardo et al. (2008) y Avellán (2009), además de otros estudios hidrogeológicos más antiguos (Krázný, (1995) y JICA, (1993)) para contrastar estas descripciones geológicas con definiciones hidrogeológicas. Es sustentado con información de descripciones litológicas de algunos pozos en el área de estudio facilitados por ENACAL para hacer una correlación estratigráfica, estos datos obtenidos de descripciones de materiales extraídos por barrenos fueron reevaluados para correlacionarlos con las descripciones geológicas propuestas y utilizar la información geológica unificada. Para lo anterior se considera la propuesta hecha por JICA, (1993) (Tabla 4.1 **Tabla**):

Tabla 4.1. Descripciones de materiales de barreno de los pozos y su posible indicativo geológico.

Descripción de materiales de pozos	Posible Indicativo Geológico
Grava	Aglomerados
Grava con arena	Toba Brechosa
Arena	Toba o Toba Brechosa
Arena con Arcilla	Toba
Arcilla	Toba Arcillosa o Toba meteorizada
Arcilla Café	Suelo Fósil
Roca o Bolones	Flujos Piroclásticos

Fuente: JICA (1993)

La descripción de la sucesión estratigráfica desde la base al techo encontrada en trabajos anteriores, en trabajo de campo propio y descripciones de barrena en pozos, para este estudio es descrita así:

Formación Las Sierras:

Formación Las Sierras Medio (TQpS-M)

Los afloramientos típicos de esta formación fueron descubiertos por JICA (1993), en las paredes de los cráteres de Asososca, Nejapa y Tiscapa, y también en los cañones profundos en el flanco sureste de Las Sierras de Managua

proyectadas dentro del área de estudio y encontradas como sucesiones horizontales a unos 45 metros de profundidad en el área de estudio, como muestra la Ilustración 19. Consisten de aglomerados basálticos masivos y compactos, aglomerados andesíticos con toba brechosa (Toba Lapilli) y Toba con contenido de Pisolitos. El color es principalmente Gris a Gris oscuro, pero cambia de color a grisáceo en las cercanías de San Rafael a rojizo oscuro en el área de Veracruz como describe JICA, (1993). En este estudio, de acuerdo a datos de las perforaciones JICA-3, Las Mercedes #18 y UNA-ENACAL (Ilustración 18), se determinó que esta formación es litológicamente descrita como Arcillas, Limos y Arenas con Gravas.

Por otro lado, de acuerdo a los datos existentes de las perforaciones (pozos perforados por INAA según JICA, (1993)), la litofacies es fundamentalmente descrita como Arcillas, Limo y Arena con Grava, las que solamente son descritas en los datos de perforación, por su grosor no son muy significativas. En registro de pozos más recientes (Las Mercedes #18 y UNA-ENACAL) se asocian todos estos materiales con Andesitas fracturadas, Flujos Lávicos, Aglomerados andesíticos, Arena Volcánica gruesa y Tobas. Esta Formación se encuentra interdigitada por lentes o capas finas de Arenas volcánicas.

El espesor de esta formación varía a medida que se aproxima al Lago Xolotlán, los mayores espesores se encuentran registrados en la perforación exploratoria JICA-3, con una potencia de unos 70 metros aproximadamente, en las inmediaciones del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino, en la perforación de Las Mercedes #18, la potencia es reportada aproximadamente en 60 metros, y en los datos de la perforación del Pozo de ENACAL (UNA-ENACAL) cuenta con una potencia aproximada de 30 metros (Ilustración 19).

Grupo Volcánico Masaya (QvM)

Son materiales inicialmente descritos por JICA, (1993) con afloramientos en el norte de la caldera Masaya, que corresponde al área de Ticuantepe, Veracruz y Sabana Grande y el área de estudio más al norte. Litológicamente, consiste de Lavas Basálticas (porosa y autobrechada) en la parte superior y de Flujos Lávicos y Depósitos piroclásticos de caída en la parte basal. El color es predominantemente descrito como oscuros y grises, con lentes arcillosos que cambian su color a crema. En las descripciones de los pozos mostrados en la Ilustración 18, los materiales son descritos principalmente como Arenas volcánicas de composición basáltica con granulometría muy fina a fina con clastos brechosos de color gris, llamados inicialmente por JICA, (1993) como autobrechados, son materiales integrados por el movimiento desde las lavas ya cristalizadas en la superficie del flujo hacia la parte central del mismo⁸.

Estos materiales se encuentran distribuidos en la zona, su grosor promedio es de unos 25 metros en la zona de estudio, esta capa lito-estratigráfica tiende a ganar grosor a medida que se acerca al centro eruptivo del cual surgieron, en las inmediaciones de Sabana Grande, en el Pozo exploratorio JICA-3, la potencia de esta capa es de unos 60-70 metros (Ilustración 19), en el pozo de Las Mercedes #18 la potencia es de unos 50 metros y en el pozo UNA-ENACAL la potencia es de unos 25-30 metros.

Holoceno Volcánico (QvH)

Son los materiales expulsados por La cordillera de los Marrabios, contiene estructuras volcánicas que han estado en constante actividad eruptiva reciente, el resultado de esto, son todos los materiales geológicos Cuaternarios (Q), dichos materiales se encuentran por encima del Grupo Managua (Hodgson, 2000).

⁸ Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., y Stix, J. (Eds.). (2015)

a. Las Lavas del cráter del Santiago

Comprende el frente de lava del cráter del Santiago, y la lava de los pequeños conos que se encuentran al Sur de Sabana Grande. El trabajo de Ferrey, C. J. y Kuang, J., (1971) sobre las lavas han diferenciado varios tipos con sus respectivas fuentes de erupción, Lava QL-4, Lava QL-3, QL-2 y QL-1.

La Lava QL-3, es la que aflora en las cercanías del área de estudio, unos 6 km al SO y alrededor de 1 km de Veracruz en forma de media luna (Ilustración 17), son flujos lávicos recientes, de composición basáltica. Todos los flujos de lava tienen su origen en una serie de pequeños centros cónicos asociados con el mismo flujo. Como describe Gonzáles, (2012), y representado en la Ilustración 17, desde el Volcán Masaya hasta el área de Veracruz y Sabana Grande se extienden coladas de lava de composición Basalto-Andesítico con textura vesicular de color negro, cambiando de vesicular en la parte superior a homogénea y masiva en la parte basal.

Aluvional y Material de Cubierta o Reciente (Qal y Sr)

El aluvional, como muestra la Ilustración 17, está expuesto principalmente en las partes bajas, transportados y depositados primordialmente por transporte fluvial, se encuentra mayormente en las costas del lago de Managua. Estos sedimentos fueron descritos para este estudio por medio del reconocimiento de campo, como una mezcla de materiales de deposición hídrica con cenizas volcánicas expulsadas por el volcán Santiago, pertenecientes a las erupciones recientes y materiales erosionados principalmente de la zona del escarpe de la Falla Cofradía, que representa la parte alta al Este del área de estudio.

Los Materiales de cubierta son la representación de los primeros 50 cm, corresponde a suelos del tipo orgánico, incorporados también por transporte fluvial y aéreo, es mayormente caracterizado por la presencia de raíces y material vegetal que es el área reticular, más materiales antrópicos, se encuentran con mayor potencia en zonas bajas y en causes visitados en la campaña de campo.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

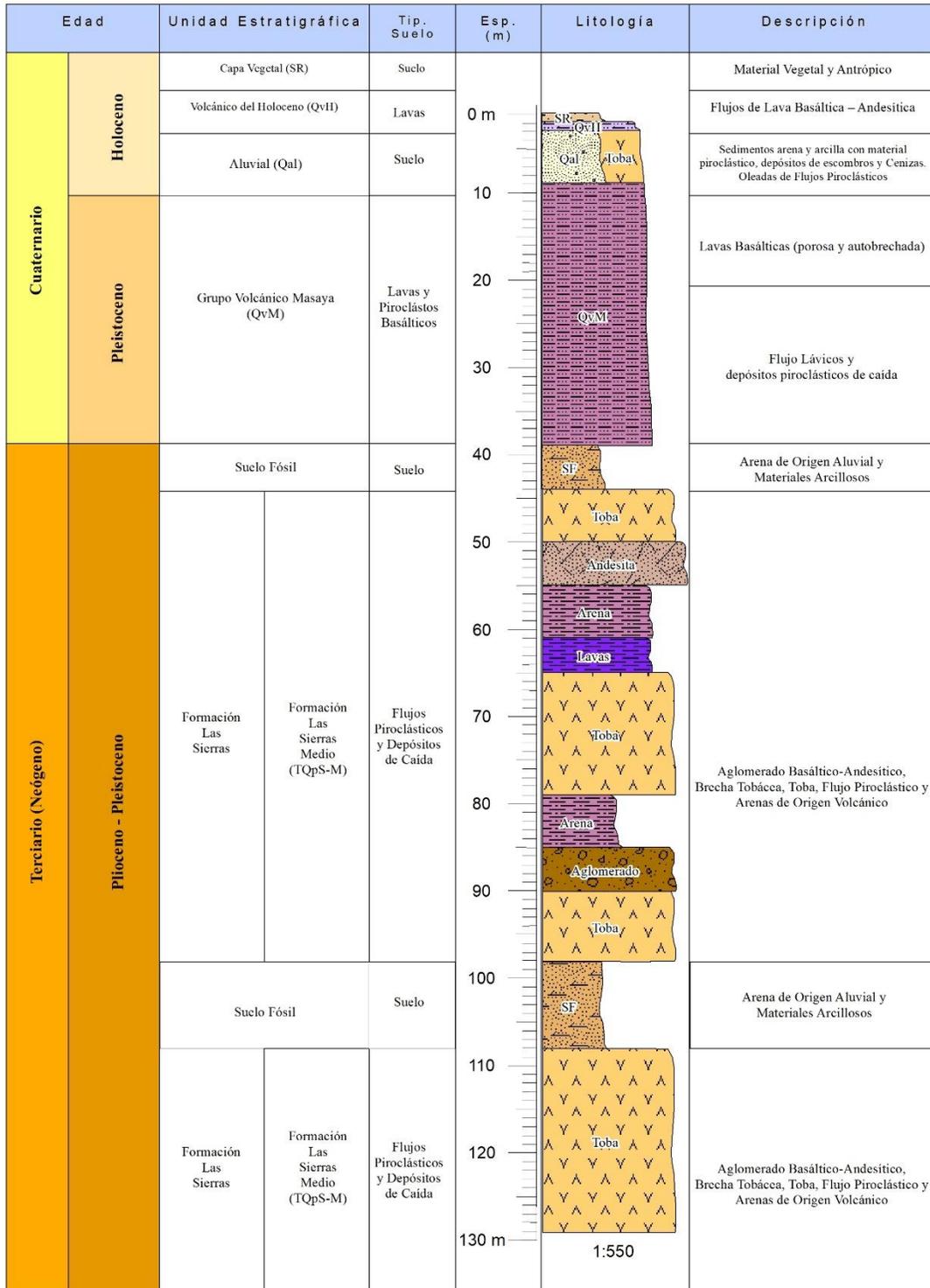


Ilustración 19. Columna Lito-Estratigráfica del área de estudio. Fuente: Elaboración propia

Análisis de la Geología estructural del área.

El área de estudio se encuentra en una depresión tectónica descrita inicialmente por Frishbutter. A. (2002) y Cowan. H et al (2000), asociada con el origen de la Depresión Nicaragüense (Girard, 2005).

El Intra-Graben se encuentra en las proximidades del borde Suroccidental de la Depresión Nicaragüense, se extiende debajo del Lago Xolotlán hasta Punta Huete y San Antonio (Frishbutter. A., 2002). Según Martínez, (2012), los límites están constituidos al Oeste la Falla Aeropuerto y al Este la Falla Cofradía, las elevaciones dentro de esta estructura varían de 60 m.s.n.m. en la parte más plana, a 360 m.s.n.m. conforme se acerca a la Falla Cofradía. Los límites Oeste y Este son asimétricos, sus dimensiones son 20.5 km de largo y un ancho variable que va desde 8.5 km en su extremo Sur a 9.6 km en su extremo Norte.

El área de estudio y las áreas más próximas a ella, están afectadas por una gran cantidad de fallas y lineamientos, probablemente generando pequeñas fallas y fracturas de manera paralela a estos. Las fallas y lineamientos se evidencian por la configuración del patrón de drenaje, relieves escarpados, y según estudios anteriores (JICA, 1993), son causantes de la existencia de fuentes termales superficiales y por la alta cantidad de sólidos disueltos en las aguas.

De acuerdo a la Ilustración 20, las fallas y lineamientos de la zona presentan orientaciones que se pueden agrupar según sus direcciones preferenciales. Se registran tres sistemas de fracturamientos:

- a) Sistemas NO – SE
- b) Sistema N – S
- C) Sistema NE – SO

Sistemas NO – SE:

Es el sistema más notorio y está estrechamente ligado a los procesos que produjeron la formación de la Depresión Nicaragüense, sobre las trazas de una de las fallas de este sistema, tal vez la más profunda, la que se ubica en la caldera Masaya y sus cráteres interiores: Masaya, Santiago y San Pedro, así como la caldera Apoyo.

Sistemas N – S y NE – SO

Estos sistemas, dispuestos en forma oblicua y casi perpendicular al sistema antes descrito, consisten generalmente de fallas más o menos paralelas y desplazamientos Normales, aunque algunas presentan desplazamiento de rumbo como la Falla de la Zona Franca, ENAG y la del Aeropuerto.

El sistema N – S es causante de las fallas que limitan el sistema de Intra-Graben del Aeropuerto como se muestra en el perfil topográfico de la Ilustración 20, limitado por la falla Cofradía al Este y por la Falla Aeropuerto al Oeste. Esta depresión, por sus características de fallamiento, presenta las características de un pequeño Graben. Las fallas marginales mencionadas, son normales, más o menos paralelas, y con una expresión topográfica casi linear N – S como la Falla Cofradía, que tiene buena expresión topográfica, y que consistente en pequeños escarpes.

Un grupo de pequeñas fallas o fracturas recientes y activas, de rumbo NE – SO, afectan la zona urbana y suburbana de la ciudad de Managua expresadas en el área de estudio. Estas fallas son paralelas, escalonadas y generalmente con desplazamiento de rumbo (Lateral Izquierdo) como se muestra en la Ilustración 20 (B) el Rumbo es N 80° E y Dirección del Buzamiento es N 10° O y un ángulo de Buzamiento de 10° - 15°. Como sugiere Cowan 2002, una estas fallas fue la que causó el terremoto acaecido el 23 de diciembre de 1972 que destruyó casi su totalidad el casco urbano de Managua. Algunas fallas de este sistema dentro del área de estudio son: ENAG y Zona Franca en la (Ilustración 20).

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

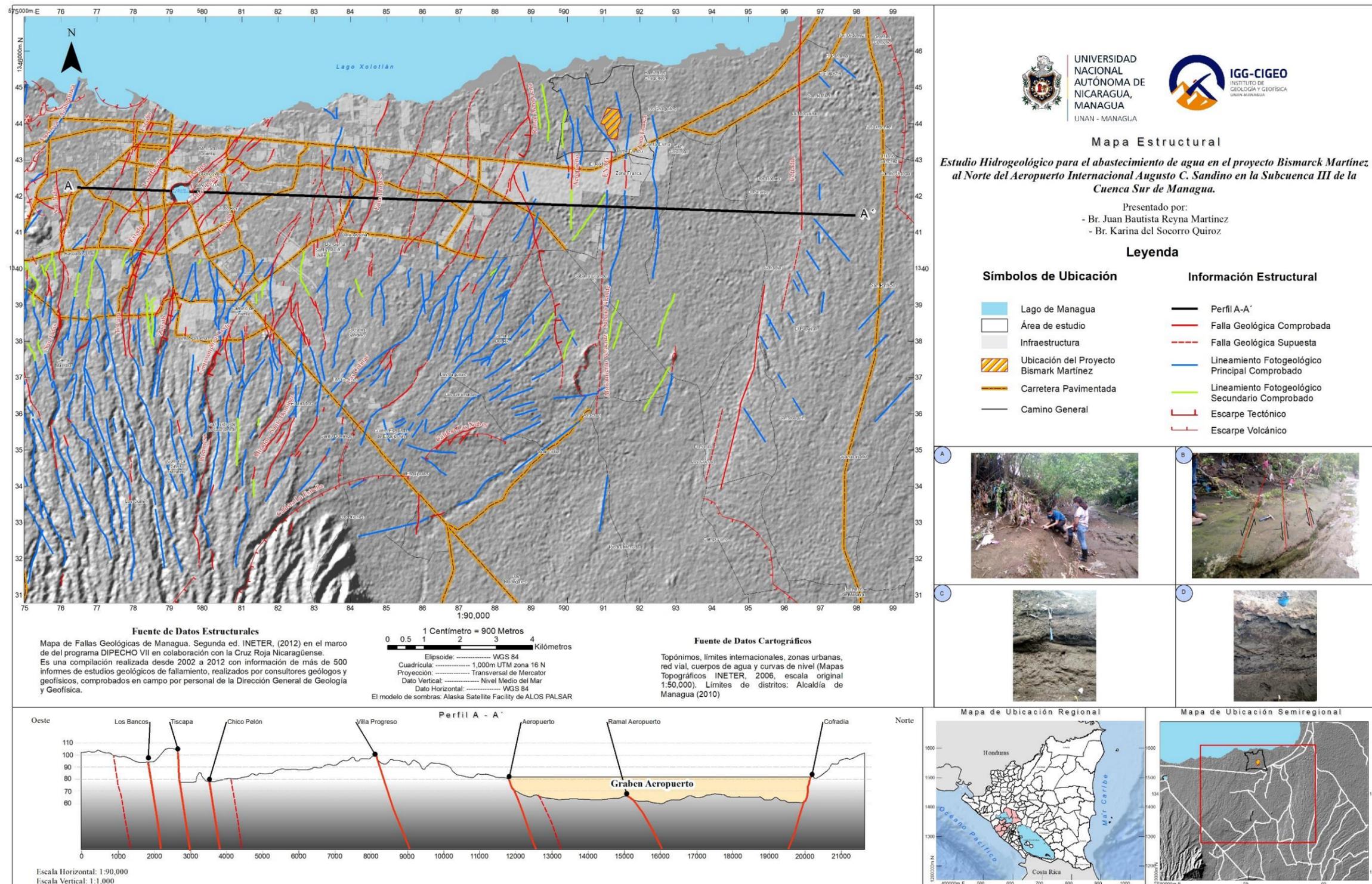


Ilustración 20. Mapa Estructural.

Propiedades Geofísicas del área de estudio

Tomografías eléctricas

Descripción general

Las imágenes de tomografía eléctrica de los 4 perfiles levantados en el área de estudio pueden verse en la Ilustración 15. La ubicación final de los perfiles puede ser leído en la Tabla 4.2 que contiene también algunos elementos cuantitativos de los perfiles, como la separación de los electrodos y la profundidad alcanzada. De manera general se encuentra en las 4 tomografías 3 rangos de resistividades ubicadas dentro de 10 Ohm m y 100 Ohm m. Estos tres rangos son: resistividades bajas entre 10 Ohm m y 26 Ohm m (representado con tonos celestes en la Ilustración 21 e Ilustración 22), resistividades intermedias entre 30 Ohm m y 44 Ohm m (tonos verdes-amarillos), resistividades medias altas entre 51 Ohm m y 100 Ohm m (tonos naranja-rojo). Estos están distribuidos en capas geo-eléctricas muy específicas que están presentes en todos los perfiles.

Tabla 4.2. Tomografías de Resistividad Eléctrica del Área de Estudio

Perfil		TE1	TE2	TE3	TE4
Inicio	X	591126	591127	591022	591070
	Y	344373	13144393	1344179	1343904
Final	X	591132	591173	591371	591313
	Y	1343605	1343628	1343694	1343422
Longitud (m)		180	180	600	500
Separación de electrodos (m)		10	10	7.5	6.5
Profundidad (m)		150	150	120	100
Resistividad (Ohm.m)	Capa 1	15 - 30	30	10 - 30	39
	Capa 2	30 -55	30 -100	30 - 76	39 -100
	Capa 3	15 - 26	15 - 28	26	30

Fuente: Elaboración propia

A continuación, detallamos cualitativamente cada una de las tomografías:

Tomografía TE1: Perfil con orientación Norte-Sur (paralelo a la dirección de flujo de descarga y a los lineamientos cercanos al área de estudio (Ilustración 20 e Ilustración 30). Este perfil está ubicado al Este dentro del área estudio. Se observan solamente dos capas geoelectricas: la primera capa tiene un espesor de 50 m y presenta mayormente resistividades intermedias (20-44 Ohm m) con algunas zonas dentro de esta capa con resistividades ligeramente altas (51-58 Ohm m). Entre 125-225 m del perfil se encuentra una anomalía a menos de 15 m de profundidad con resistividades de 20-26 Ohm m que no debe tener mucha relevancia geológica por ser muy superficial (podría deberse a material de relleno por movimientos de tierra recientes en la zona). A los 550 m del perfil se observa una zona de debilidad posiblemente debida a fracturamiento, en ese lugar se propone la perforación del pozo. Por debajo de esa capa se encuentra otra capa geoelectrica que se extiende en profundidad hasta donde se puede ver en la imagen de tomografía eléctrica. Esta es una capa muy homogénea que presenta únicamente resistividades bajas (26 Ohm m).

Tomografía TE2: Perfil con orientación Norte-Sur paralelo al perfil 1 y se encuentra ubicado al Oeste dentro del área de estudio (ver Ilustración 15). Se observan por sus características de resistividades tres capas geoelectricas. La primera capa tiene un espesor de 15 m y presenta resistividades bajas (20-26 Ohm m). La segunda capa empieza a los 30 m.s.n.m. y tiene un espesor de 20 m. Las resistividades de esta capa son medias a altas (34-100 Ohm m). Tiene 3 anomalías muy significativas con resistividades altas de 100 Ohm m la primera ubicada entre los 160-250 m, la segunda anomalía esta entre los 500-540 m y por último una anomalía entre los 600- 740 m a lo largo del perfil. En esta capa se observa una discontinuidad que puede estar asociada a algún proceso estructural que no se ha demostrado en este estudio. Estas primeras dos capas coinciden en profundidad y espesor en conjunto con la primera capa geoelectrica de la tomografía TE1. La tercera capa muestra rangos de resistividades bajas (26 Ohm m), es una capa muy homogénea que no presenta anomalías, coincide en resistividad y profundidad con la tercera capa de la tomografía TE1.

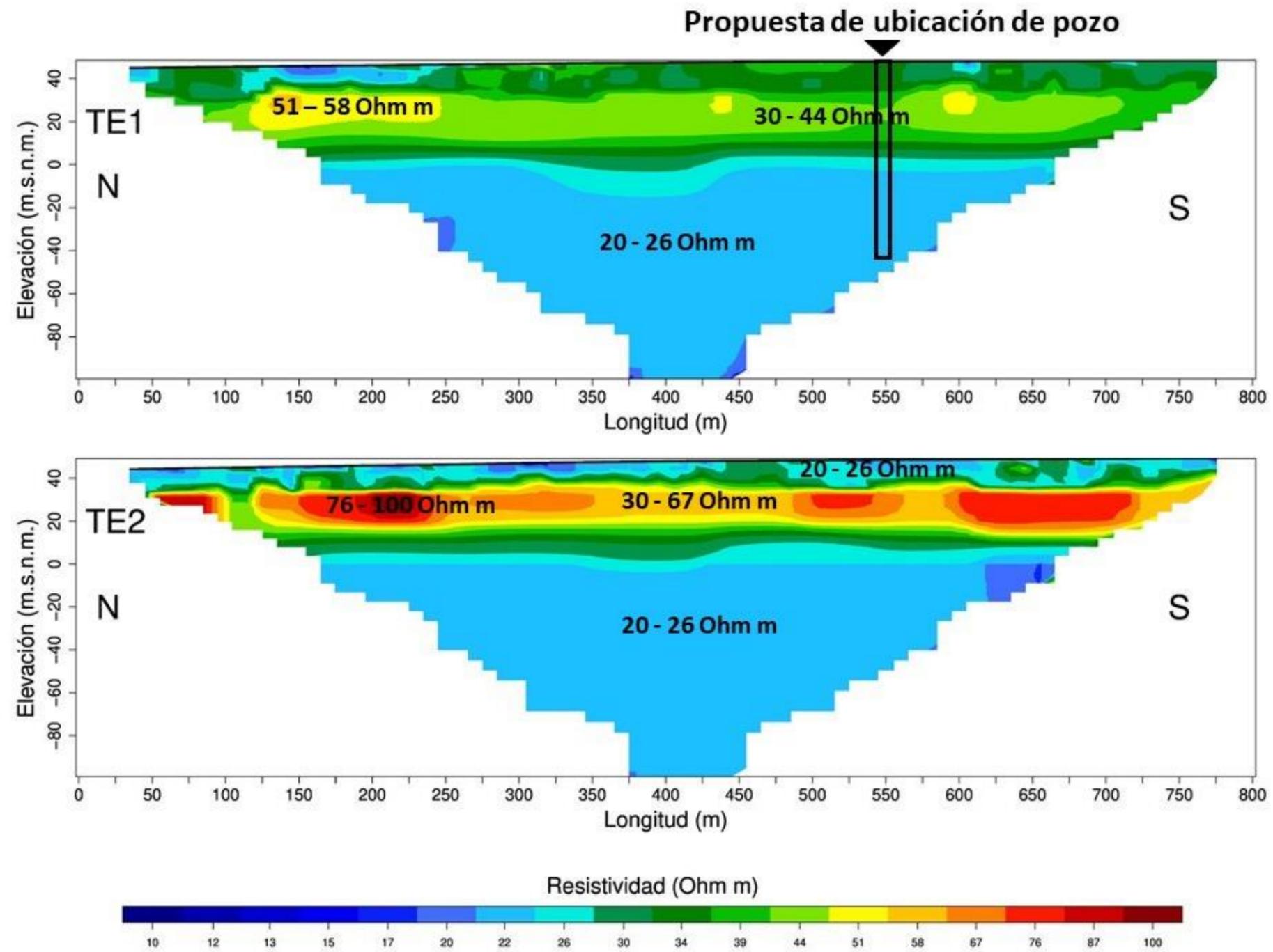


Ilustración 21. Secciones 2D de Tomografías eléctricas TE1 y TE2

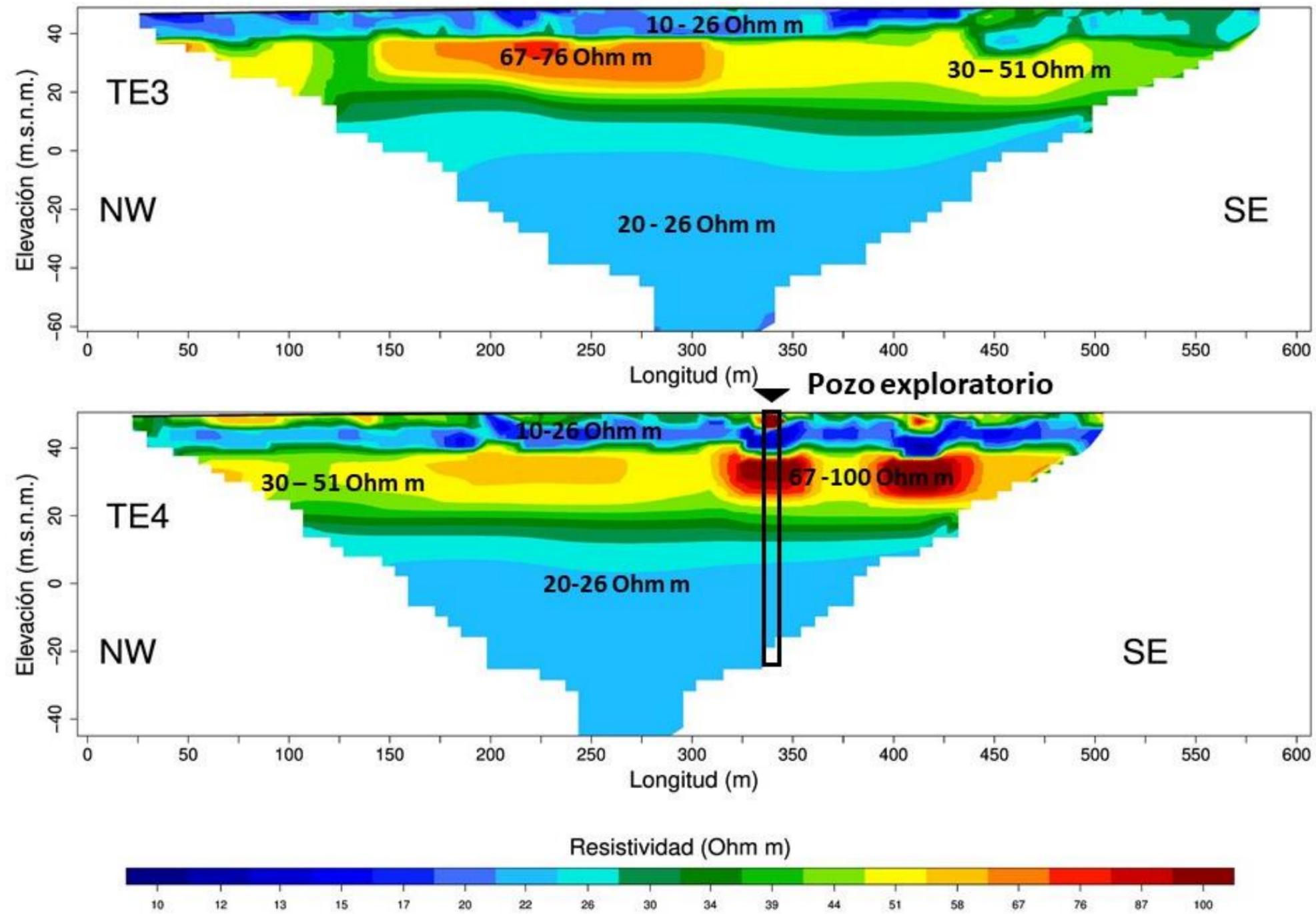


Ilustración 22 Secciones 2D de Tomografías eléctricas TE3 y TE4.

Tomografía TE3: Perfil con orientación Noroeste-Sureste, se encuentra cortando al perfil TE1 y TE2 (Ilustración 15 e Ilustración 23). Este perfil es semi-perpendicular a la dirección del flujo de descarga (Ilustración 30) y a la dirección de los lineamientos más cercanos al área de estudio que han sido reportados (Ilustración 20). A pesar de eso no se ven estructuras directamente asociadas con estos lineamientos en toda la imagen de tomografía eléctrica (Ilustración 22), sin embargo, en algunos puntos se observan algunas discontinuidades, las que no se han podido caracterizar en este estudio. Al igual que en la tomografía TE2 se pueden observar tres capas geoelectricas con las mismas características de resistividad, profundidad y espesor que en dicho perfil. La primera capa geoelectrica (resistividades bajas, 15-26 Ohm m) coincide completamente con la primera capa de la tomografía TE2. La segunda capa geoelectrica (resistividades medias y altas, 30-76 Ohm m) se encuentra entre 35-10 m.s.n.m., y presenta una anomalía entre los 200-300 m a lo largo del perfil con resistividades relativamente altas 67-76 Ohm m con características muy similares a las anomalías vistas en la segunda capa geoelectrica de la tomografía TE2. La tercera capa geoelectrica empieza a los 0 m.s.n.m., y es similar a la capa 2 de las tomografías TE1 y a la capa 3 de la tomografía en el sentido que muestra el mismo rango de resistividades (26 Ohm m). Esta capa geoelectrica se extiende en profundidad hasta donde la imagen de tomografía eléctrica permite ver.

Tomografía TE4: Perfil con orientación Noroeste-Sureste, se encuentra cortando al perfil de la tomografía eléctrica TE2 (Ilustración 15 e Ilustración 23) y pasa aproximadamente a medio metro de la ubicación del pozo exploratorio. Al igual que en la tomografía TE3 este perfil es semi-perpendicular a la dirección del flujo de descarga (Ilustración 30) y a la dirección de los lineamientos más cercanos al área de estudio (Ilustración 20). Sin embargo, en este perfil tampoco se encuentran estructuras directamente asociadas a estos lineamientos. A pesar de esto en esta capa se pueden ver algunas debilidades estructurales, las que al igual que las mencionadas con anterioridad, no han podido categorizarse. Este perfil es muy similar al perfil TE3 ya que también se identifican tres capas geoelectricas: la

primera capa presenta mayormente resistividades bajas (10-26 Ohm m) con algunas zonas dentro de esta capa con resistividades ligeramente altas 51-100 Ohm m a lo largo del perfil, que pueden deberse a material de relleno. La segunda capa es similar a la capa 2 de la tomografía TE3 y tiene rangos de resistividades medias y altas (34-100 Ohm m). Presenta dos anomalías significativas, la primera entre los 340-370 m justo donde se encuentra ubicado el pozo exploratorio y una segunda muy cercana a la primera anomalía entre los 390-440 m, con resistividades muy altas (100 Ohm m). Por último, la tercera capa geoelectrica es similar a la última capa de las tomografías anteriores por presentar resistividades bajas (26 Ohm m), es una capa muy homogénea y se extiende en profundidad hasta donde la imagen de tomografía eléctrica permite ver.

Imagen 3D Correlación entre los perfiles

La ubicación 3D de los 4 perfiles de tomografía eléctrica puede observarse en la Ilustración 23. En dicha ilustración podemos ver que las capas geoelectricas identificadas en los perfiles coinciden entre sí, por lo que el área de estudio presenta características de ser muy homogénea. Una característica del terreno que se puede ver en la correlación de las imágenes es que la tomografía (TE1) que se encuentra al este, no presenta anomalías altamente resistivas. prácticamente todas las anomalías altamente resistivas ubicadas entre los 30-0 m.s.n.m. están en la parte Oeste o hacia el Norte del área de estudio. Es importante mencionar que la ubicación del pozo exploratorio coincide con una de estas anomalías.

Estas anomalías probablemente corresponden a lavas poco fracturadas. Posiblemente esta situación dificultó el proceso de perforación cuando se encontraban a la profundidad donde comienza la anomalía. El terreno en general presenta características de resistividades muy homogéneas después de los 0 m.s.n.m. donde no se encuentran anomalías ni estructuras importantes en toda el área de estudio.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

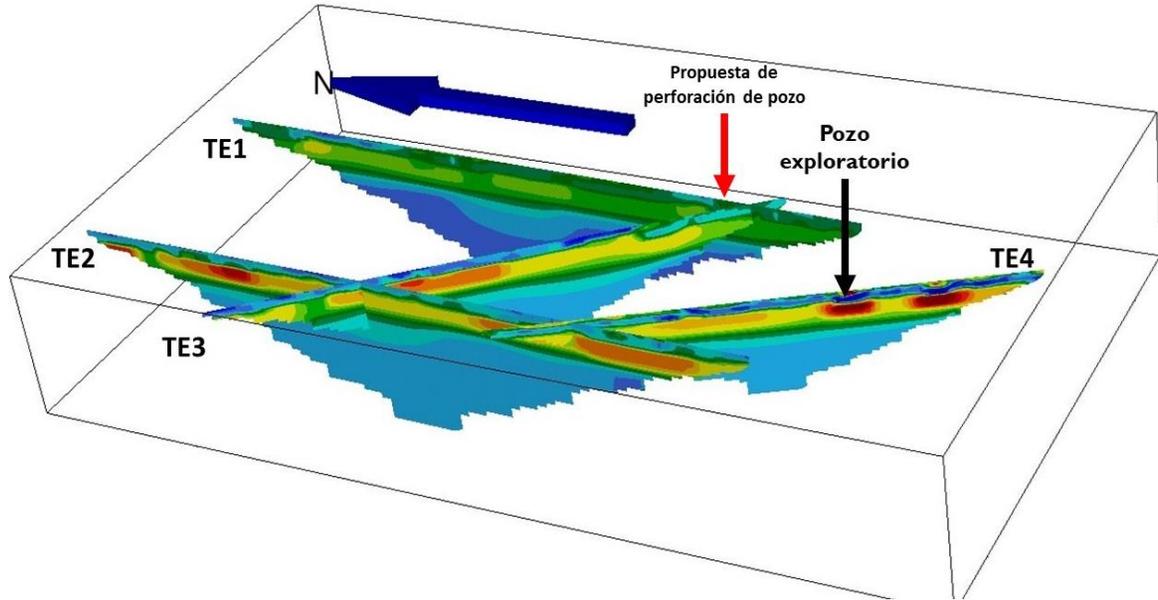


Ilustración 23. Imagen tridimensional de resistividad eléctrica en la dirección de los perfiles TE1, TE2, TE3 y TE4.

Correlación Geología-Geofísica

Las resistividades encontradas en las tomografías son coherentes con los materiales reflejados en la columna lito-estratigráfica (Ilustración 19).

Las capas del subsuelo son homogéneas, pero es importante mencionar que existe un espesor muy importante de resistividades medias a altas entre los 30-0 m.s.n.m. en todas las tomografías (Tabla 4.3). Una característica que se puede observar en la segunda capa de las tomografías eléctricas, son algunas zonas de debilidad estructural, sin embargo, no es posible afirmar o demostrar que estén asociadas a fallamiento ya que se necesitaría más información y que en este estudio este objetivo no fue contemplado. En Tabla 4.3 se describen los 4 perfiles geoelectricos y su correlación con la geología del área de estudio y con estudios anteriores.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Tabla 4.3 Correlación entre resistividad y litología del área de estudio.

Información	Litología	Resistividades en este estudio (Ohm.m) TE	Resistividades de JICA (1993) SEV (Ohm.m)	Espesor de las capas en las tomografías (m)
Depósitos aluviales	Capas arcillosas	10 - 26	8 - 25	15
	Capas arenosas			
	Capas de Grava			
Grupo Volcánico Masaya	Depósitos piroclásticos	30 - 100	10 - 200	30
	Lavas basálticas (porosa y autobrechada)			
	Flujos lávicos y depósitos piroclásticos de caída			
	Arena de origen aluvial y materiales arcillosos			
Grupo Medio Las Sierras	Aglomerado basáltico-andesítico, Brecha tobácea, Toba, Flujo Piroclástico y arenas de origen volcánico	15-26	10 - 80	80
	Aglomerado basáltico-andesítico, Brecha tobácea, Toba, Flujo Piroclástico y arenas de origen volcánico			

Fuente: Elaboración propia

Tanto en este estudio como en JICA (1993) coinciden en tres capas resistivas con la misma litología. La primera capa corresponde a depósitos aluviales con resistividades menores a los 34 Ohm m, la segunda capa más resistiva tiene valores mayores a los 50 Ohm m y pertenece al grupo volcánico Masaya, y la última capa que pertenece a la formación Las Sierras tiene valores de resistividad menores a los 30 Ohm m. A partir de esta información se ha generado una representación de esta correlación antes descrita (Ilustración 24).

De los resultados de las 4 tomografías eléctricas y a la correlación geológica-geofísica, se ha encontrado las mismas capas en los 4 perfiles geoelectricos. Sin embargo, la primera capa de la tomografía eléctrica TE1 tiene características de ser una capa muy fracturada. Considerando esto se determina el sitio idóneo para perforar en la zona Este dentro del área de estudio sobre el perfil de tomografía eléctrica TE1 en el punto de referencia (Ilustración 23 y Anexo #4) con coordenadas Norte: 591337.7 y Este: 1343700.6.

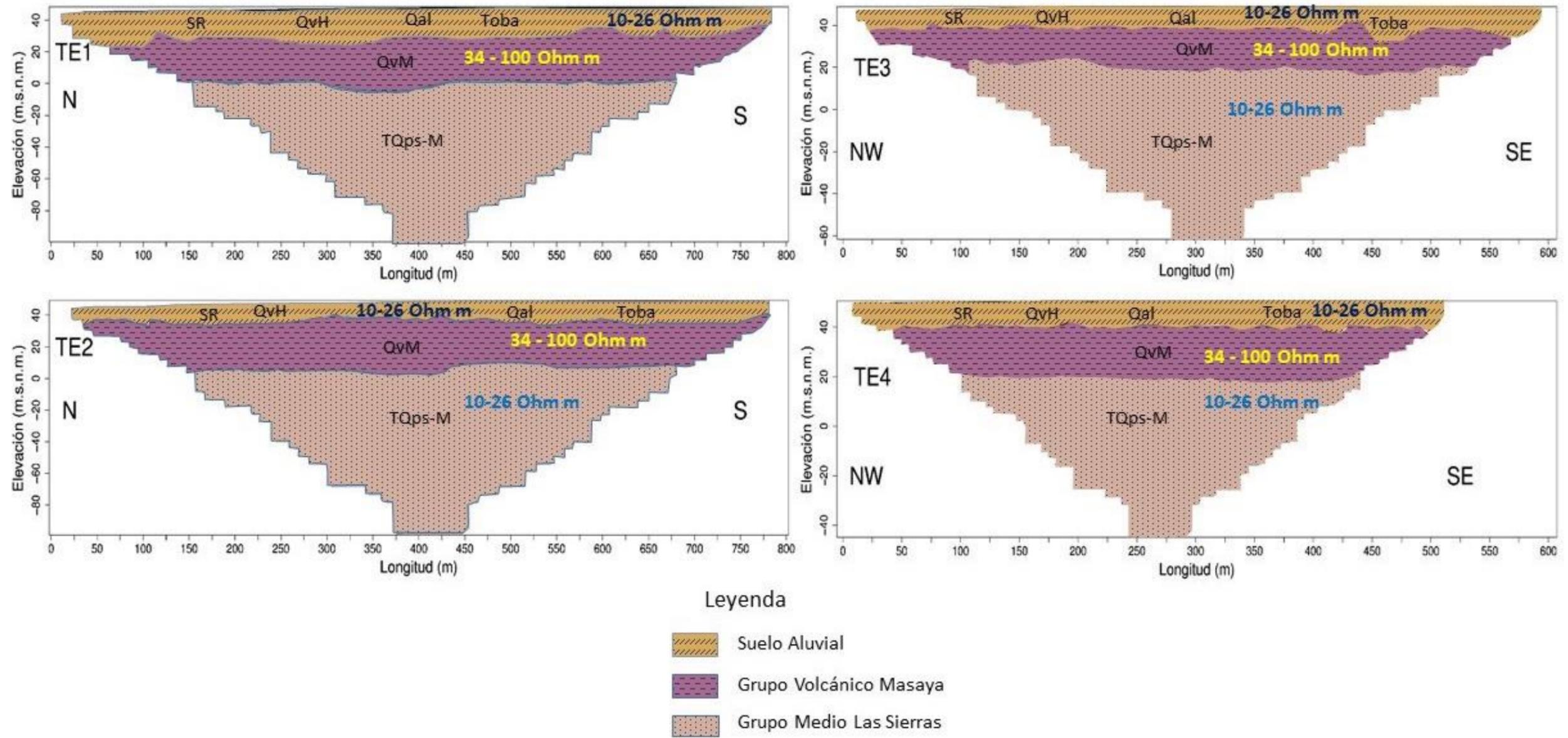


Ilustración 24. Representación de la correlación geológica-geofísica.

Registro Geofísico de pozo

En la Ilustración 25 se muestran los resultados del registro del pozo del área de estudio. El comportamiento de la Temperatura fue constante en los primeros 13 m en los que sube a 33°C hasta los 31m, después de los 31 metros se mantiene constante en casi todo el registro. Así mismo, la conductividad se comportó de manera similar a la temperatura.

De acuerdo al registro eléctrico, gamma natural y potencial espontáneo, temperatura y conductividad se identifican 5 zonas de permeabilidad:

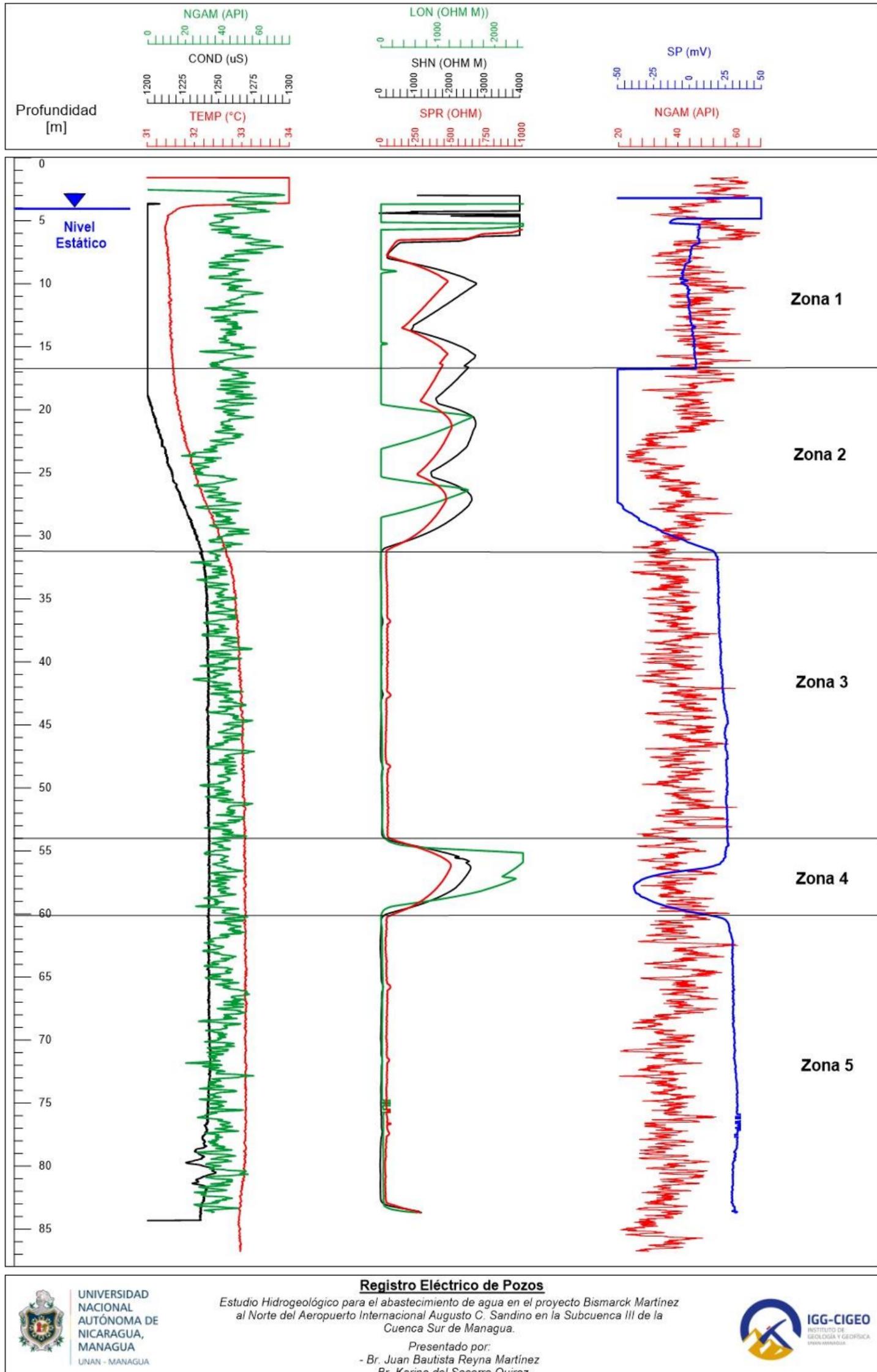


Ilustración 25. Registro geofísico del pozo exploratorio

Zona 1 (4-17 m): de acuerdo a los parámetros registrados en la sonda definimos esta región como permeable. En esta zona la temperatura desciende al entrar al medio acuático a los 4 m de 34° C a 31. 5° C, mientras la conductividad se mantiene baja. La resistividad en esta zona es alta para todos los sensores y el potencial espontáneo con 15 mV se mantiene constante.

Zona 2 (17-32 m): esta es una zona muy permeable de acuerdo al registro. Al entrar en esta zona, la temperatura sube constantemente hasta llegar a los 33° C, al igual que la conductividad continúa aumentando hasta 1250 μ S. En esta zona el potencial espontáneo invierte su polaridad de 10 mV a -50 mV, esto puede ocurrir por la presencia de capas muy permeables y por la diferencia entre la resistividad afectada por el filtrado del lodo y el agua de formación, también se ve un cambio en el gamma natural que indica un cambio de litología. Se observa una separación entre las curvas de resistividad que podría deberse a la invasión del lodo de perforación dentro de la formación.

Zona 3 (32-54 m): La temperatura de esta zona se mantiene constante en 33° y la conductividad también se mantiene constante. Se observa poca invasión del lodo de perforación, visible en la corta separación de las curvas de resistividad, teniéndose un rango de resistividad entre los 0 y 100 ohm m. La respuesta del registro de potencial natural indica un ligero corrimiento del lado derecho del registro hasta los 30 mV, sin embargo, de acuerdo con lo observado a los valores obtenidos con el registro de rayos gamma se interpreta esta capa como poco permeable.

Zona 4 (54-60 m): En esta zona el potencial espontáneo invierte su polaridad y muestra un pico a los 58 m con valores de 30 mV a -26 mV, esto puede deberse a; que haya una capa muy permeable ya que estas generan una carga opuesta, o que exista una pequeña cavidad que no es observable en la tomografía por su resolución, pero si es observable en el registro debido a la resolución. Se distingue una separación en las curvas de resistividad que podría deberse a la invasión del lodo de perforación dentro de la formación, lo que sugiere zonas permeables, probablemente debidas a fracturamiento. Con respecto a la temperatura y el gamma natural sus valores se mantienen constantes.

Zona 5 (60-87 m): Esta zona mantiene constantes sus valores de temperatura, conductividad, y gamma natural. Se interpreta como una capa permeable con bajo contenido de arcillas. Hay separación de las curvas de resistividad eléctrica y una respuesta casi constante del registro de potencial espontáneo.

Los resultados del registro de pozo tienen coherencia con los resultados obtenidos de las tomografías eléctricas. La primera capa muy permeable que se encuentra en la segunda zona, corresponde a la capa resistiva de 15 metros de espesor que se encuentra en todas las tomografías eléctricas, especialmente en la tomografía 4 que se levantó en el sitio de ubicación del pozo exploratorio. Con respecto a la zona 4 que seguramente corresponde a una capa muy permeable con unos 5 m de espesor, no se obtuvo información de esta capa en las tomografías, esto es debido a que las tomografías tienen una separación de electrodos que no permite obtener buena resolución, en este sentido las tomografías muestran la segunda capa de resistividades bajas como una sola capa. Con respecto a la capa 3 y 5, según los valores de potencial espontáneo corresponderían a zonas permeables, además hay que tener en cuenta que los valores de resistividad son bajos ya que es una zona fracturada y la saturación de agua será mayor considerando también que hay bajo contenido de arcillas.

Hidrogeología del área de estudio

Balance hídrico climático

Se realizó un balance climático (P-E) en base a datos climáticos de la zona estudiada para un periodo de 11 años, desde el 2007 hasta el 2018, estos han sido recopilados por INETER en la Estación Pluviométrica Principal que se encuentra ubicada en el Aeropuerto Internacional A. C. S. aquí se analizaron las precipitaciones, evaporaciones y temperaturas medias mensuales por cada año. Estos datos han sido utilizados para realizar un balance hídrico climático, este balance puede dividirse en tres segmentos representativos: a) Pérdidas en la Reserva, b) Periodo de estabilidad y c) Periodo de Ganancia de la Reserva (Tabla 4.4).

a) Las Pérdidas en las reservas se presentan en los meses desde noviembre hasta mediados de abril, cinco meses del año, donde las salidas del sistema exceden los ingresos (Ilustración 27). b) El Periodo relativo de estabilidad está dentro de los meses centrales del año hidrológico, aquí se da el cambio de la estación seca a lluviosa en el país. Desde mayo a agosto, los niveles de reservas se mantienen, las ganancias son muy pocas (Ilustración 27). c) El periodo de Ganancias de las reservas es la parte del año cuando se registran las mayores precipitaciones en el país, son los meses desde finales de agosto a finales de noviembre (Ilustración 26).

Partiendo de las Precipitaciones, la Evaporación Media Mensual Anual en mm y la Temperatura Media Mensual Anual en °C, se pudo estudiar el comportamiento climático a lo largo de un periodo de 11 años. Este conocimiento ha sido muy útil para determinar la falta y excesos de agua. Se ha determinado que en la zona hay un impacto negativo, se representa en las pérdidas o faltas de agua en cuanto al sistema climático, este impacto es representado como que el 83% del año hidrológico se encuentra en pérdidas.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Del análisis del balance hídrico climático se deduce que existe dominio de la evaporación sobre las precipitaciones. Este análisis evidencia así una variación de las reservas. Como resultado del análisis se concluye que la evaporación es la de mayor influencia en el área de estudio, frente a las entradas evaluadas para esta misma zona.

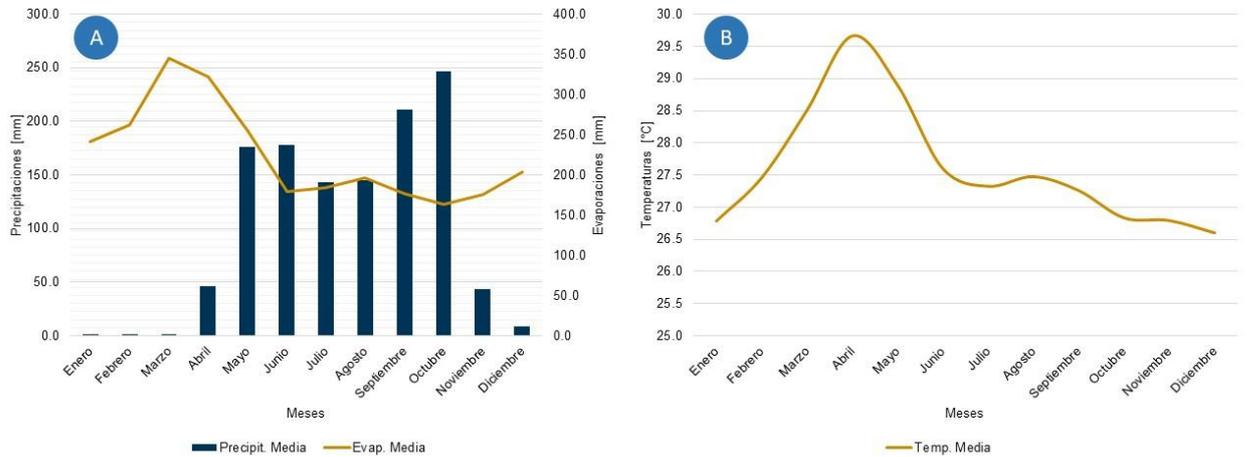


Ilustración 26. A) Representación de las variables climáticas para el área de estudio, B) Temperatura media mensual en °C. Fuente: Elaboración propia con datos mensuales proporcionados por INETER en los años 2007-2018.

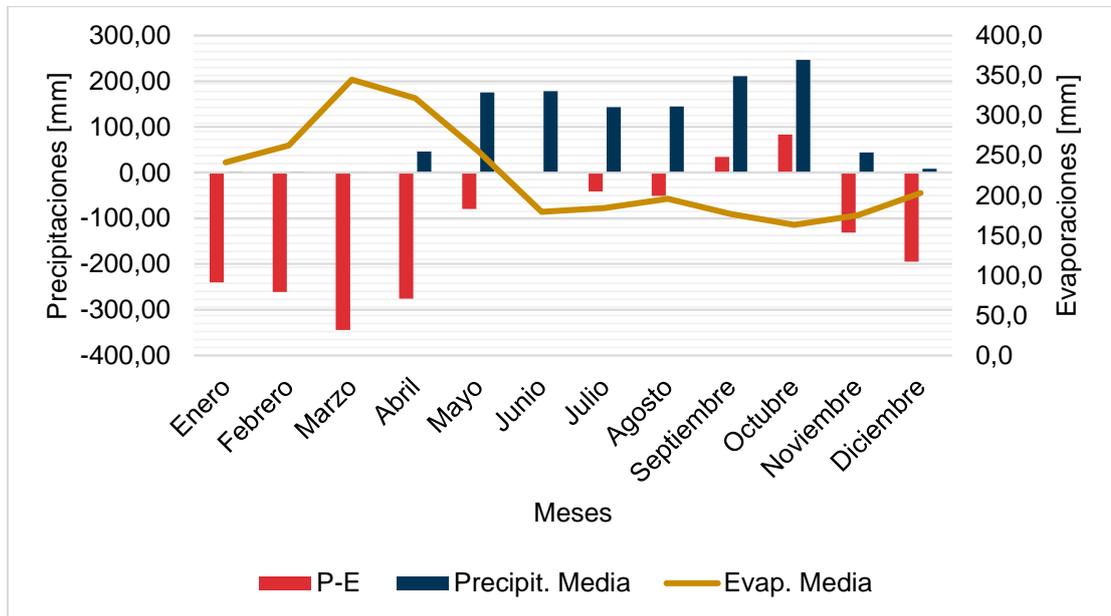


Ilustración 27. Representación del balance climático para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos mensuales proporcionados por INETER en los años 2007-2018. *Precipit. M.: Precipitación Media Mensual en mm; Evap. M.: Evaporación Media Mensual en mm.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Tabla 4.4. Características Climáticas de la estación del Aeropuerto Internacional A. C. S.

INSTITUTO NICARAGÜENSE DE ESTUDIOS TERRITORIALES						
DIRECCIÓN GENERAL DE METEOROLOGÍA						
RESUMEN METEOROLÓGICO ANUAL						
Estación:	Aeropuerto Internacional A. C. Sandino			Código:	69027	
Departamento: Managua				Municipio:	Managua	
Latitud:	12°08'36"			Longitud:	86°09'49"	
Años:	2007-2018			Elevación:	56 msnm	
Parámetros:	Precipitación	Evaporación	Temperatura	Tipo:	HMP	
Meses	Parámetro	Suma	Media	Máx	Min	P-E
Enero	P	14.9	1.2	3.6	0.0	-240.30
	E	2898.5	241.5	278.6	203.0	
	T	321.4	26.8	27.7	25.8	
Febrero	P	16.6	1.4	12.3	0.0	-261.20
	E	3151.0	262.6	310.0	227.5	
	T	329.5	27.5	28.5	26.6	
Marzo	P	4.8	0.4	2.4	0.0	-344.41
	E	4137.7	344.8	384.7	321.8	
	T	342.1	28.5	29.6	27.8	
Abril	P	552.8	46.1	298.0	0.0	-275.53
	E	3859.1	321.6	365.9	247.8	
	T	356.0	29.7	30.5	29.1	
Mayo	P	2108.3	175.7	349.2	31.1	-79.54
	E	3062.8	255.2	318.1	191.7	
	T	346.8	28.9	30.0	28.0	
Junio	P	2136.2	178.0	335.3	73.2	-1.51
	E	2154.3	179.5	233.7	158.6	
	T	331.2	27.6	28.8	26.9	
Julio	P	1720.1	143.3	341.0	34.7	-40.87
	E	2210.5	184.2	239.8	148.8	
	T	327.9	27.3	28.8	26.7	
Agosto	P	1739.5	145.0	331.7	46.2	-50.98
	E	2351.3	195.9	238.3	162.6	
	T	329.7	27.5	28.8	26.4	
Septiembre	P	2535.9	211.3	379.2	107.4	34.60
	E	2120.7	176.7	220.0	146.9	
	T	327.1	27.3	28.4	26.6	
Octubre	P	2961.1	246.8	455.6	93.8	83.44
	E	1959.8	163.3	190.1	138.2	
	T	322.0	26.8	28.0	26.2	
Noviembre	P	526.4	43.9	80.9	2.5	-131.42
	E	2103.4	175.3	199.7	160.3	
	T	321.5	26.8	27.7	26.0	
Diciembre	P	98.7	8.2	19.8	0.0	-194.91
	E	2437.6	203.1	236.6	176.6	
	T	319.2	26.6	28.4	25.1	

Fuente: Elaboración propia con promedios mensuales proporcionados por INETER en los años 2007-2018. *P: Precipitación en mm, T: Temperatura en °C, E: Evaporación en mm. P-E: en mm

Balance Hídrico de suelos

Para el Balance de suelo, es necesario tener los datos de la infiltración mensual al suelo generada por la lluvia. Además, es necesario conocer la capacidad de campo y punto de marchitez del suelo. Estos valores, se obtienen directamente en laboratorios de suelos o se estiman mediante valores tabulados, también es necesario saber aproximadamente la profundidad de las raíces en la zona. Adicional, es necesario conocer la fracción interceptada por el follaje, la capacidad de infiltración según el tipo de suelo y otras características de la zona como las precipitaciones para conocer la escorrentía (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Parámetros según las características del tipo de suelo del área de estudio para el cálculo del balance hídrico de suelos.

Parámetro	Valor	Fuente
Pendiente [-]	Plana (0.20)	Schosinsky & Losilla, (2000)
Cobertura Vegetal [-]	Zacate menos del 50% (0.09)	Schosinsky & Losilla, (2000)
Textura [-]	Franco Arenoso	Mapa de tipo de suelo de INETER, (2015)
CC [%]	11	Grassi, (1976)
PM [%]	4	Grassi, (1976)
Densidad Aparente [g/cm ²]	1.40	Grassi, (1976)
Prof. De Raíces [m]	0.005	Grassi, (1976)

Fuente: Elaboración propia con datos de la bibliografía

La infiltración

El factor que más influye en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo (Kfc), que a su vez depende de la infiltración básica del suelo (fc) (Schosinsky, 2006). Para este estudio el valor de fc corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 cm de profundidad, por considerar que éste es el espesor que está en contacto directo con el agua de lluvia. Dicho valor se obtuvo en campo con medidas con el Permeámetro de Guelph, aplicado a una profundidad de 30 cm (Anexo 1).

Evapotranspiración

Se calculó ETP según Thornthwaite (Ilustración 28) pero en este balance consideramos ETo, calculada según Allen et al., (2006) a partir de la evaporación de pana de la estación del Aeropuerto Internacional A.C Sandino para los años 2007 a 2018, y un factor de corrección de 0.65, dado que está basado en la evaporación local y ya que los valores son similares, por lo que se decidió no utilizar un método de corrección empírica.

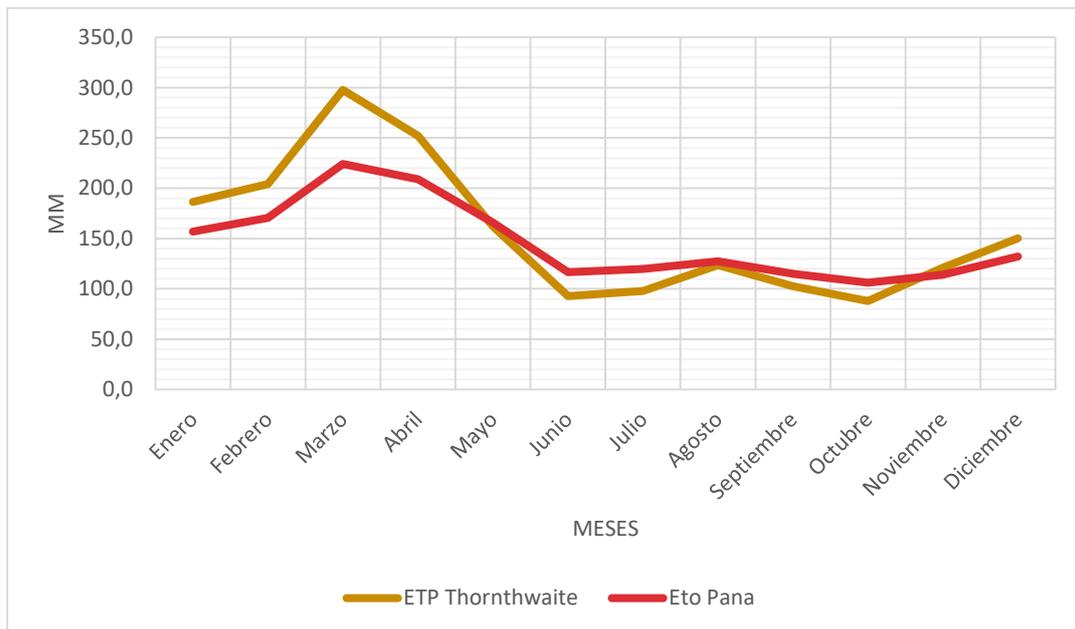


Ilustración 28. Comparación entre los métodos para calcular la Evapotranspiración. Fuente: Elaboración propia con datos de evapotranspiración sin corregir de la estación Aeropuerto para los años desde 2007 a 2018.

Por consistencia, las unidades de los parámetros como la capacidad de campo, el punto de marchitez, humedad del suelo, precipitación y evapotranspiración serán en milímetros. Para esto Schosinsky, (2006), propone convertir estos parámetros, antes dados en porcentaje, a milímetros. La capacidad de campo en una franja igual a la profundidad de raíces de la zona, en un suelo con características presentadas en la Tabla 4.5 la Capacidad de Campo en el área de estudio es de 7.7 mm, el punto de Marchitez de 2 mm.

Se ha seleccionado la humedad inicial del mes el final de la época de mayor precipitación, ya que se encuentra a capacidad de campo, Schosinsky, (2006) propone que después de dos meses consecutivos en que la precipitación que infiltra mensualmente supera la evapotranspiración para estos meses se cumplirá lo anterior, para este estudio la humedad inicial será noviembre.

Recarga potencial al acuífero

Según el balance hídrico de suelos con la metodología Schosinsky, (2006), (Tabla 4.6) La recarga potencial (Rp) es representada únicamente en el mes de septiembre y octubre, ya que la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. La recarga potencial anual es la suma de las recargas potenciales mensuales, para este estudio este valor es igual a **37.13 mm/año**, lo que equivale a 3.09% de la precipitación anual.

La Evapotranspiración real (ETR) que corresponde a las salidas del suelo, está en función de la humedad máxima y mínima en el suelo, este valor es igual a **360.13 mm**, lo que corresponde al 29.9 % de la precipitación anual.

La escorrentía (ESC) que es generada por lluvia mensual está en función de las precipitaciones y las características del suelo para infiltrar la misma, para este estudio, las escorrentías fueron estimadas en 652.98 mm, lo que equivale al 54.3% de las precipitaciones anuales. Y la Retención (RET) para el área es de **652.98 mm**, lo que correspondería al 54.35 % de las precipitaciones anuales (Tabla 4.6).

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Tabla 4.6. Balance Hídrico con la metodología propuesta por Schosinsky, (2006)

BALANCE HIDRICO DE SUELOS																																																																																																																																																																																																																																																																			
Gunther Schosinsky																																																																																																																																																																																																																																																																			
Zona de Estudio:		Proyecto BM																																																																																																																																																																																																																																																																	
Fecha:		Octubre de 2020																																																																																																																																																																																																																																																																	
Textura de Suelo:		Franco-Arenoso																																																																																																																																																																																																																																																																	
Uso de suelo		Pastizales																																																																																																																																																																																																																																																																	
% Area de la subcuenca																																																																																																																																																																																																																																																																			
Simbología																																																																																																																																																																																																																																																																			
fc: Capacidad de Infiltración.						P: Precipitación Media Mensual.																																																																																																																																																																																																																																																													
I: Infiltración.						Pi: Precipitación que infiltra.																																																																																																																																																																																																																																																													
CC: Capacidad de Campo.						ESC: Escorrentía Superficial																																																																																																																																																																																																																																																													
PM: Punto de Marchitez.						ETP: Evapotranspiración Potencial.																																																																																																																																																																																																																																																													
PR: Profundidad de Raíces.						ETR: Evapotranspiración Real.																																																																																																																																																																																																																																																													
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.						HSi: Humedad de Suelo Inicial.																																																																																																																																																																																																																																																													
DS: Densidad de Suelo.						HD: Humedad Disponible																																																																																																																																																																																																																																																													
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR						HSf: Humedad de Suelo Final.																																																																																																																																																																																																																																																													
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR						DCC: Déficit de Capacidad de Campo.																																																																																																																																																																																																																																																													
Kp: Factor por pendiente (ver léame)						Rp: Recarga Potencial																																																																																																																																																																																																																																																													
Kv: Factor por vegetación (ver léame)						NR: Necesidad de Riego.																																																																																																																																																																																																																																																													
Kí: Factor estimado con base a la prueba de infiltración						Ret: Retención de Iluvia																																																																																																																																																																																																																																																													
Fc prueba infiltracion																																																																																																																																																																																																																																																																			
0.88 mm/hr																																																																																																																																																																																																																																																																			
por peso																																																																																																																																																																																																																																																																			
(mm)																																																																																																																																																																																																																																																																			
(%)																																																																																																																																																																																																																																																																			
CC		11.00		7.70																																																																																																																																																																																																																																																															
PM		4.00		2.80																																																																																																																																																																																																																																																															
(CC-PM)		7.00		4.90																																																																																																																																																																																																																																																															
Área																																																																																																																																																																																																																																																																			
0.98 km2																																																																																																																																																																																																																																																																			
980000.0 m2																																																																																																																																																																																																																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Concepto</th> <th>Ene</th> <th>Feb</th> <th>Mar</th> <th>Abr</th> <th>May</th> <th>Jun</th> <th>Jul</th> <th>Ago</th> <th>Sep</th> <th>Oct</th> <th>Nov</th> <th>Dic</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P (mm)</td> <td>1.20</td> <td>1.40</td> <td>0.40</td> <td>46.10</td> <td>175.70</td> <td>178.00</td> <td>143.30</td> <td>145.00</td> <td>211.30</td> <td>246.80</td> <td>43.90</td> <td>8.20</td> <td>1201.30</td> </tr> <tr> <td>Ret [mm]</td> <td>1.20</td> <td>1.40</td> <td>0.40</td> <td>5.53</td> <td>21.08</td> <td>21.36</td> <td>17.20</td> <td>17.40</td> <td>25.36</td> <td>29.62</td> <td>5.27</td> <td>5.00</td> <td>150.81</td> </tr> <tr> <td>Pi (mm)</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>15.35</td> <td>58.51</td> <td>59.27</td> <td>47.72</td> <td>48.28</td> <td>70.36</td> <td>82.18</td> <td>14.62</td> <td>1.21</td> <td>397.51</td> </tr> <tr> <td>ESC (mm)</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>25.22</td> <td>96.11</td> <td>97.37</td> <td>78.39</td> <td>79.32</td> <td>115.58</td> <td>135.00</td> <td>24.01</td> <td>1.99</td> <td>652.98</td> </tr> <tr> <td>ETo (mm)</td> <td>157.00</td> <td>170.68</td> <td>224.13</td> <td>209.03</td> <td>165.90</td> <td>116.69</td> <td>119.74</td> <td>127.36</td> <td>114.87</td> <td>106.16</td> <td>113.93</td> <td>132.04</td> <td>1757.53</td> </tr> <tr> <td>HSi (mm)</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>3.73</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>7.70</td> <td>7.70</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> </tr> <tr> <td>C1</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>C2</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>HD (mm)</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>15.35</td> <td>58.51</td> <td>59.27</td> <td>48.65</td> <td>48.28</td> <td>70.36</td> <td>87.08</td> <td>19.52</td> <td>1.21</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ETR (mm)</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>15.35</td> <td>58.51</td> <td>58.35</td> <td>48.65</td> <td>48.28</td> <td>57.44</td> <td>53.08</td> <td>19.52</td> <td>1.21</td> <td>360.38</td> </tr> <tr> <td>HSf (mm)</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>3.73</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>7.70</td> <td>7.70</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> <td>2.80</td> </tr> <tr> <td>DCC (mm)</td> <td>4.90</td> <td>4.90</td> <td>4.90</td> <td>4.90</td> <td>4.90</td> <td>3.97</td> <td>4.90</td> <td>4.90</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>4.90</td> <td>4.90</td> <td>4.90</td> </tr> <tr> <td>Rp (mm)</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>8.03</td> <td>29.11</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>37.13</td> </tr> <tr> <td>NR (mm)</td> <td>161.90</td> <td>175.58</td> <td>229.03</td> <td>198.58</td> <td>112.29</td> <td>62.32</td> <td>75.99</td> <td>83.98</td> <td>57.44</td> <td>53.08</td> <td>99.32</td> <td>135.73</td> <td>1445.22</td> </tr> <tr> <td>Rp en el área (m3)</td> <td></td> <td>36389.9</td> </tr> <tr> <td colspan="12">comprobacion Reten+ETR+Esc+Recarga=Pcp</td> </tr> <tr> <td colspan="12">1201.30</td> </tr> </tbody> </table>												Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	P (mm)	1.20	1.40	0.40	46.10	175.70	178.00	143.30	145.00	211.30	246.80	43.90	8.20	1201.30	Ret [mm]	1.20	1.40	0.40	5.53	21.08	21.36	17.20	17.40	25.36	29.62	5.27	5.00	150.81	Pi (mm)	0.00	0.00	0.00	15.35	58.51	59.27	47.72	48.28	70.36	82.18	14.62	1.21	397.51	ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	25.22	96.11	97.37	78.39	79.32	115.58	135.00	24.01	1.99	652.98	ETo (mm)	157.00	170.68	224.13	209.03	165.90	116.69	119.74	127.36	114.87	106.16	113.93	132.04	1757.53	HSi (mm)	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	3.73	2.80	2.80	7.70	7.70	2.80	2.80	C1	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25	C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	HD (mm)	0.00	0.00	0.00	15.35	58.51	59.27	48.65	48.28	70.36	87.08	19.52	1.21		ETR (mm)	0.00	0.00	0.00	15.35	58.51	58.35	48.65	48.28	57.44	53.08	19.52	1.21	360.38	HSf (mm)	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	3.73	2.80	2.80	7.70	7.70	2.80	2.80	2.80	DCC (mm)	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	3.97	4.90	4.90	0.00	0.00	4.90	4.90	4.90	Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.03	29.11	0.00	0.00	37.13	NR (mm)	161.90	175.58	229.03	198.58	112.29	62.32	75.99	83.98	57.44	53.08	99.32	135.73	1445.22	Rp en el área (m3)													36389.9	comprobacion Reten+ETR+Esc+Recarga=Pcp												1201.30											
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total																																																																																																																																																																																																																																																						
P (mm)	1.20	1.40	0.40	46.10	175.70	178.00	143.30	145.00	211.30	246.80	43.90	8.20	1201.30																																																																																																																																																																																																																																																						
Ret [mm]	1.20	1.40	0.40	5.53	21.08	21.36	17.20	17.40	25.36	29.62	5.27	5.00	150.81																																																																																																																																																																																																																																																						
Pi (mm)	0.00	0.00	0.00	15.35	58.51	59.27	47.72	48.28	70.36	82.18	14.62	1.21	397.51																																																																																																																																																																																																																																																						
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	25.22	96.11	97.37	78.39	79.32	115.58	135.00	24.01	1.99	652.98																																																																																																																																																																																																																																																						
ETo (mm)	157.00	170.68	224.13	209.03	165.90	116.69	119.74	127.36	114.87	106.16	113.93	132.04	1757.53																																																																																																																																																																																																																																																						
HSi (mm)	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	3.73	2.80	2.80	7.70	7.70	2.80	2.80																																																																																																																																																																																																																																																						
C1	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25																																																																																																																																																																																																																																																						
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																																																																																																																																																																																																																																																						
HD (mm)	0.00	0.00	0.00	15.35	58.51	59.27	48.65	48.28	70.36	87.08	19.52	1.21																																																																																																																																																																																																																																																							
ETR (mm)	0.00	0.00	0.00	15.35	58.51	58.35	48.65	48.28	57.44	53.08	19.52	1.21	360.38																																																																																																																																																																																																																																																						
HSf (mm)	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	3.73	2.80	2.80	7.70	7.70	2.80	2.80	2.80																																																																																																																																																																																																																																																						
DCC (mm)	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	3.97	4.90	4.90	0.00	0.00	4.90	4.90	4.90																																																																																																																																																																																																																																																						
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.03	29.11	0.00	0.00	37.13																																																																																																																																																																																																																																																						
NR (mm)	161.90	175.58	229.03	198.58	112.29	62.32	75.99	83.98	57.44	53.08	99.32	135.73	1445.22																																																																																																																																																																																																																																																						
Rp en el área (m3)													36389.9																																																																																																																																																																																																																																																						
comprobacion Reten+ETR+Esc+Recarga=Pcp																																																																																																																																																																																																																																																																			
1201.30																																																																																																																																																																																																																																																																			

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo más datos de la bibliografía, las componentes climáticas corresponden a un promedio de entre los años 2007 al 2018 de la estación Aeropuerto A. C. Sandino.

Inventario de Pozos

Según este inventario, se han identificado en el área de estudio un total de 12 pozos, 2 perforados y 10 excavados, sin embargo, más del 30%, 3, no se utilizan. El pozo público está bajo el control administrativo de ENACAL, los pozos domésticos son mantenidos por sus propios usuarios. Esta información ha sido recopilada durante la primera y segunda semana del mes de mayo y la primera semana del mes de agosto del 2020 para objetivos de este trabajo, la red de pozos, excavados o perforados, públicos o privados fuera del área de estudio, no han sido considerados.

Se inventariaron 12 pozos, 10 excavados y 2 perforados únicamente se visitaron dos perforados, uno de carácter público (ENACAL) y otro privado. Las profundidades de los niveles de agua subterránea varían entre 2.3 m y 12.75 metros en el periodo de mayo a agosto.

La Tabla 4.7 muestra los datos recopilados. El agua de los pozos es usada para riego, baño, para el ganado y animales domésticos, no se reporta uso para consumo humano.

Tabla 4.7 Inventario de pozos

Pozo N°	Información del Propietario		Información del Sitio					Datos del Pozo					Parámetros medidos en campo				Cargas hidráulicas			
	Nombre del Pozo	Nombre del Propietario	Coordenadas UTM			Acceso	Urbano o Rural	Tipo de Pozo	Bomba	NEA Mayo	NEA Ago (m)	Brocal (m)	Prof. del Pozo (m)	Temp. (C°)	pH	CE (µS/cm)	TDS (ppt)	Carga Mayo (m)	Carga Agosto	Diferencia (m)
			X	Y	Z															
1	Aguas Claras	Armanda Canales	590661	1343767	47	si	Rura	Excavado	si	2.3	2.23	0.4	3.78	29.9	8.8	1550	0.53	56.67	56.74	0.07
2	El Rodeo	José Ángel Hernández	590635	1344118	46	si	Rural	Excavado	si	2.9	2.53	0.4	4	29.4	7.73	1820	0.91	52.96	53.33	0.37
3	El Rodel, Finca Elizabeth	Julio Camios	591592	1345254	46	si	Rural	Excavado	no	3.22	3	0.5	4	30	7.8	1300	0.66	49.20	49.42	0.22
4	La Playa	María Auxiliadora Blandón	591579	1345602	45	si	Rural	Excavado	si	4.2	2.88	0.7	4.7	30.1	7.57	1340	0.67	47.46	48.78	1.32
5	Pozo UNA	ENACAL	591387	1343080	53	si	Urbano	Perforado	si	12.17		0.59	91	34.1	7.6	1070	0.53	43.52		
6	Comarca los Chagüites	Marlene Pasquir	592485	1344604	45	si	Rural	Excavado	si	4.4	3.58	0.58	5.18	31	7.55	1590	0.79	54.04	54.86	0.82
7	Comarca los Chagüites II	Virginia Rodríguez	592646	1345308	46	si	Rural	Excavado	si	4	2.84	0	4.5	31.2	7.45	1780	0.88	48.17	49.33	1.16
8	Casa de dos pizos	Oscar José Madrigal Roque	592164	1345568	44	si	Rural	Excavado	si	5	4.26	0.6	5.78	31.3	7.6	1600	0.8	45.69	46.43	0.74
9	Santa Elena - Monte Fresco	Vaneza Martínez	591389	1343640	50	si	Rural	Excavado	no	3.65	3.4	0.5	5.32	28.6	8.44	2060	1.03	53.87	54.12	0.25
10	Monte Fresco	Ivan Villavicencio	592221	1344011	47	si	Rural	Perforado	si	2.7	1.96	0.4	70	31.5	7.8	1140	0.57	54.65	55.39	0.74
11	Los acetunes	Juan Salvador Úbeda	591019	1343510	51	si	Rural	Excavado	no	4.3	4.25	0	6.25	28.2	7.74	1300	0.65	56.42	56.47	0.05
12	Monte Fresco II	Edgar Díaz	591610	1344382	59	si	Rural	Excavado	no	0	2	0.48	4	NE	NE	NE	NE	-	56.06	0

Fuente: Elaboración Propia. *NE: no especificado ya que no se tomó en campo.

Fluctuaciones de la superficie freática

Los niveles de agua subterránea se midieron en mayo y agosto del 2020. Durante este periodo la precipitación acumulada máxima fue de 63.4 mm según la estación del IGG CIGEO (X: 579446.5, Y: 1339050.8 [m]), se utilizaron los datos de esta estación como referencia ya que no se disponen los datos de la estación aeropuerto para ese periodo.

Los asensos varían entre 0.070 y 1.32 metros, con una media de 0.52 metros, estos asensos están asociados a las precipitaciones. Como se muestra en la Tabla 4.7, los niveles en agosto, después de las primeras lluvias, sufrieron un aumento en los pozos en las cercanías del Lago Xolotlán (Pozos #5,#4 y #6 en la Ilustración 29), lo que se representa como menores cargas, dichos aumentos fueron más representativos en los pozos cercanos al Lago Xolotlán (Ilustración 30).

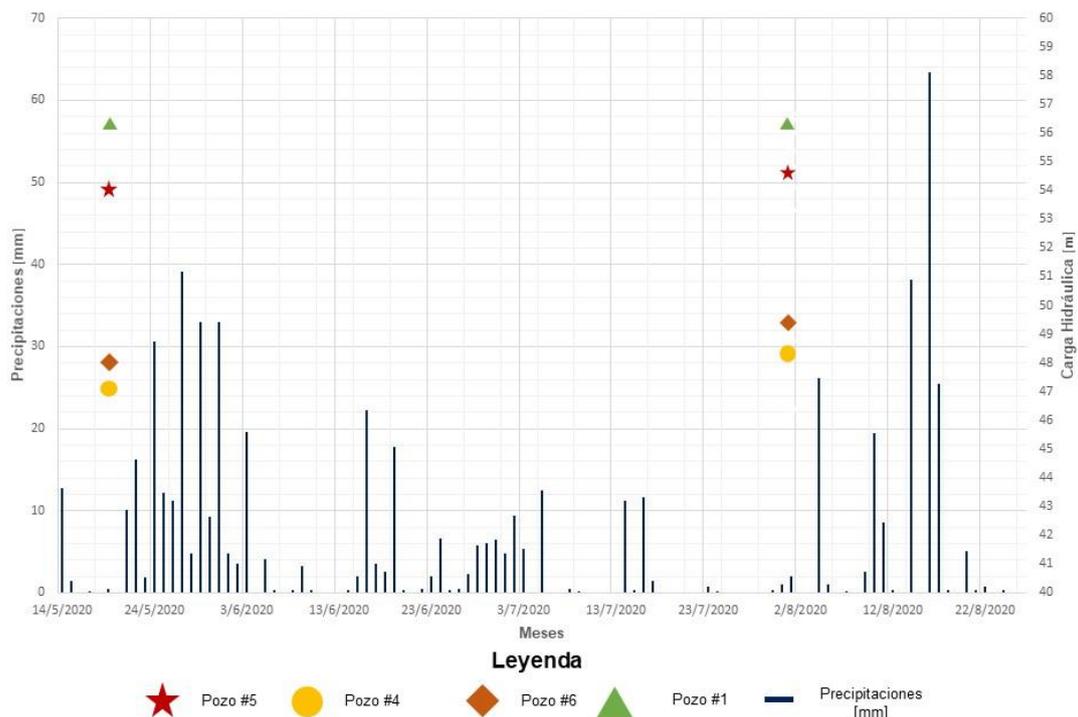


Ilustración 29. Comportamiento del Nivel Freático y comportamiento de las Precipitaciones entre los meses de mayo y agosto. *Datos de Precipitación Acumulada fueron facilitados por el área de SIG del IGG-CIGEO/UNAN-Managua, de la estación ubicada en el mismo instituto. Fuente: Elaboración propia.

Superficie Freática y dirección de flujo

Según la Ilustración 30, la elevación del agua subterránea en la zona estudiada, con referencia del nivel medio del mar, se encuentra entre los 56 y los 45 metros, el sector más bajo corresponde a la cota del Lago de Xolotlán, estimado en 45 metros por medio de un Modelo Digital de Elevaciones, lo que concuerda con las elevaciones obtenidas en campo con un GPS de mano. Para las elevaciones tomadas con el GPS se hizo un promedio de los Waypoints durante 5 minutos, con muestras cada segundo, lo que redujo el nivel de error vertical hasta menos de 1 m, a estas elevaciones fue restado el valor de la suma de los Niveles Estáticos del Agua subterránea, más los brocales de los pozos, en el caso que tuviera, resultando el nivel piezométrico.

En la misma Ilustración 30, se muestra el comportamiento entre los meses de mayo (equipotenciales negras) y agosto (equipotenciales rojas), la configuración de la superficie del agua subterránea y muestra la dirección del flujo subterráneo, pone en evidencia que las aguas subterráneas tienen un movimiento relativamente paralelo en dirección Norte, hacia el Lago Xolotlán, que se considera en este estudio y anteriores como la zona de descarga del sistema acuífero. El cambio entre los meses de mayo y agosto son representados en las líneas piezométrica más cercanas al Lago Xolotlán.

Gradiente Hidráulico

El gradiente hidráulico (ecuación (2) de la zona está representado como el cambio entre las cargas hidráulicas en una distancia conocida. Conforme a la Ilustración 30 el gradiente hidráulico es:

$$i (e) = \frac{(56 \text{ m}) - (45 \text{ m})}{2,200 \text{ m}} = 5 \times 10^{-3} [-]$$

Se han considerado el gradiente para el tubo de flujo subterráneo que corresponde al inicio de las líneas equipotenciales en el Sur del área de estudio y las líneas equipotenciales al Norte, en la parte del Lago Xolotlán (Ilustración 30).

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

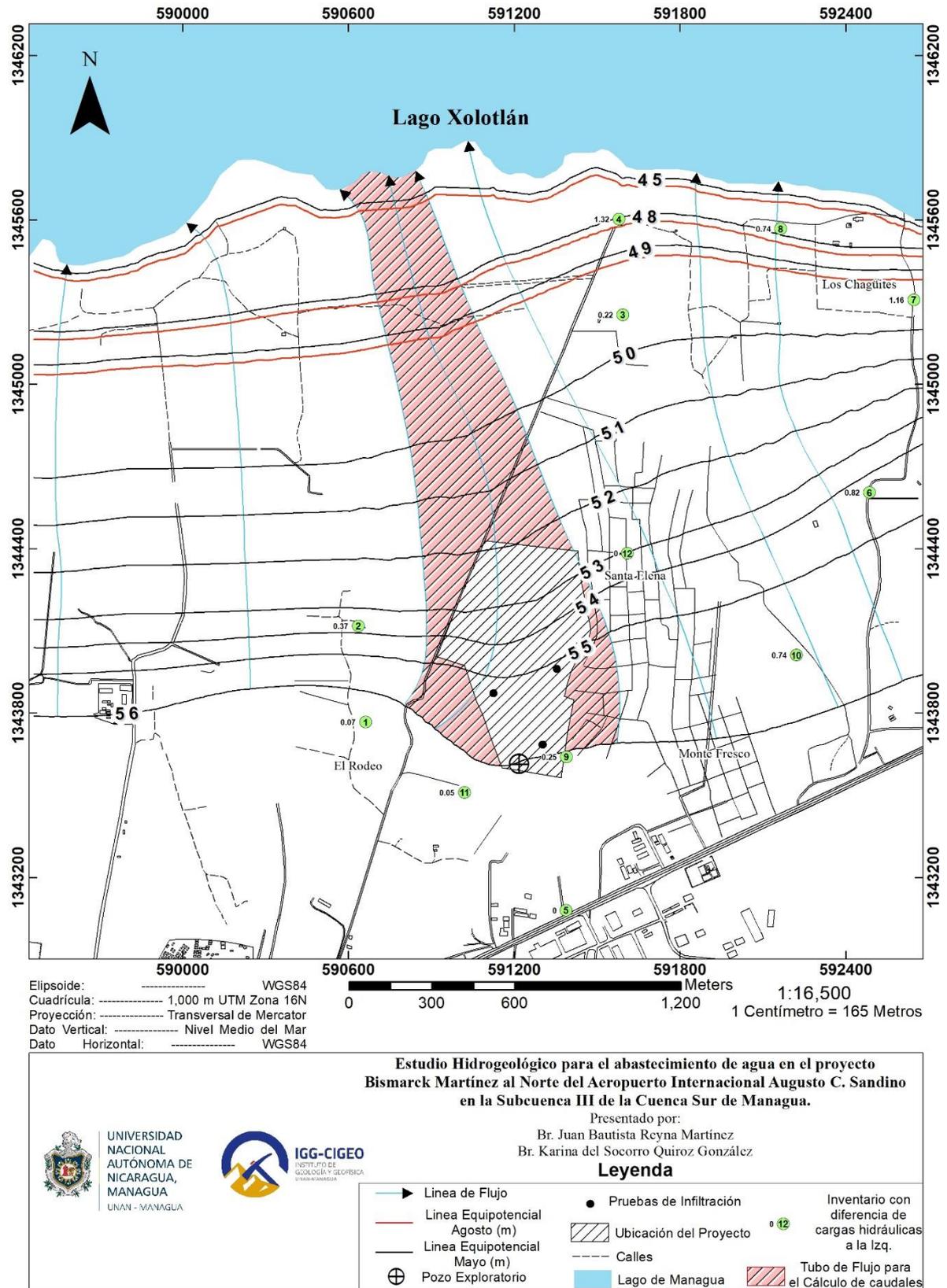


Ilustración 30. Mapa Piezométrico del área de estudio. Fuente: Elaboración propia

Parámetros hidráulicos del acuífero

Transmisividad (T)

La transmisividad del acuífero ha sido determinada a partir de una prueba de bombeo realizada por ENACAL en el pozo UNA-ENACAL a unos 600 metros del área de estudio en 2004, el análisis es del tipo Cooper y Jacob/Time-Drawdown a descarga constante durante 24 horas.

La prueba de bombeo fue de caudal escalonado, el cual sirvió para estimar la eficiencia. Se partió de un caudal inicial de 1135.62 l/min con un descenso de 3.557 m, siguiendo con 1521.7308 l/min con descenso de 4.572 m y por último a un caudal de 1904.0562 l/min con un descenso total de 5.736 m y una prueba de caudal constante durante 24 horas para conocer los parámetros como la Transmisividad.

Las medidas de abatimiento, registradas a lo largo de estas pruebas, fueron analizadas y presentadas con el programa AQTESOLV Pro v4.5 Acuífero Test Software para el cálculo de la Transmisividad, Conductividad y Capacidad Específica (ANEXO #2). La información de ubicación y características de los pozos se describen a continuación:

Tabla 4.8 Información de pozos del área de estudio

Nombre del Pozo	UNA-ENACAL	Bismarck Martínez
Localidad	Universidad Agraria	Monte Fresco
NEA	8.534 metros	4 metros
Profundidad	91.44 metros	91.44 metros
Ademe	25.4 cm	25.4 cm

Fuente: ENACAL más este estudio.

El pozo penetra parcialmente el acuífero, por ello, la Transmisividad presentada no corresponde al espesor total de las unidades hidro-estratigráficas de la zona, sino sólo a la parte superior estudiada para estos pozos (91.4 m). La Transmisividad fue estimada en **340 [m²/día]**.

Estimación de la conductividad hidráulica (K)

El valor de la conductividad hidráulica para el área de estudio, con las características antes mencionadas (Tabla 4.8), ha sido calculada desde el valor de la Transmisividad como **4.63 [m/día]**.

Tabla 4.9 Resumen de los Parámetros Hidráulicos estimados para el área de estudio

Pozo	Transmisividad (T) [m ² /día]	Conductividad (K) [m/día]
UNA-ENACAL	340	4.63

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por ENACAL

Discusión de las Causas posibles de variación de Transmisividad en la zona.

Autores en el pasado han estudiado las características de las propiedades hidráulicas de la zona, los que se tomarán como referencia para este estudio serán: JICA (1993) y Krázný (1995). Los valores presentados de Transmisividad por dichos autores se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4.10 Comparación de parámetros hidráulicos presentados en distintos estudios

Fuente	Prof. (m)	Adame (cm)	Rejilla (m)	Descarga (m ³ /Día)	NEA (m)	T (m ² /día)	Método
JICA, 1993	360	30	100	2,998.08	14.5	20,475.16	Jacob (1946)
Krázný, 1995	220	NE	NE	NE	NE	1,000	NE
UNA - ENACAL	91.44	25	25	125.4	16.7	340	Jacob (1946)

Fuente: Elaboración propia con datos de la bibliografía más datos proporcionados por ENACAL. *NE= No Especificado en el informe.

Como se mostró en la Tabla 4.10, existe una variabilidad de las Transmisividades expuesta durante los años en distintos estudios, las mayores están presentadas por JICA, (1993) para el pozo exploratorio JICA-3, en las inmediaciones de Sabana Grande, posteriormente Krázný, (1995) presenta valores de Transmisividad regional, en la zona desde Veracruz, pasando por Las

Mercedes, hasta el Lago Xolotlán, correspondientes a valores menores presentados por JICA, (1993), para este estudio se estimó un valor en las cercanías de la costa del Lago Xolotlán, con una variación de un orden de magnitud con respecto a las expuestas inicialmente por JICA, (1993) (Tabla 4.10).

Las causas de las variaciones de Transmisividad en los acuíferos, incluso en áreas reducidas como en el presente estudio, podrían tener diversas causas que podrían actuar en conjunto haciendo que los órdenes de valores de Transmisividad cambien. Las causas aquí resaltadas fueron en base a las que hizo Krázný, (1995) de manera regional, la clasificación de las causas para este estudio será:

1. Causas Geológica
2. Causas Hidrogeológicas
3. Causas por captaciones

1. La heterogeneidad de los materiales litológicos dentro del área de estudio podrían causar estos cambios, pero a como se muestra en la Ilustración 17 los cambios en los espesores de cada litología no son muy marcados y la distribución de las capas es prácticamente homogénea en toda la zona estudiada, por lo que no se considera que estos cambios sean debido a la litología.

2. La Transmisividad podría ser afectada también por la penetración de la captación de la cual fue calculada. A como pudo demostrar Krázný, (1995) en el área de Veracruz y Sabana Grande existen anomalías positivas de Transmisividades, esto a causa de las profundidades de los pozos, así se comprobó que con la mayor representación del tramo saturado mediante pozos profundos probablemente se incremente el valor, como se muestra en la Transmisividad del pozo JI-3 (Tabla 4.10). Adicionalmente, es imprescindible indicar que, a como precisó el mismo autor, los valores de Transmisividad en las zonas consideradas como descargas de sistemas acuíferos tienen mayor valor, lo que podría indicar que, para el área de estudio, estando en las cercanías de la zona de descarga (Lago Xolotlán), los valores de Transmisividad aumentarían si la intersección de la zona saturada aumenta.

3. Añadiendo a lo antes descrito, hay que considerar que las metodologías para la realización de la prueba de bombeo, la metodología de perforación, el diámetro del pozo, entre otras, pueden causar diferencias en resultados presentados en cada estudio. Como otra causa muy importante puede ser el revestimiento y la ubicación de las rejillas. También inexactitudes de medición, cálculo e interpretación de los datos, pueden cambiar considerablemente los resultados obtenidos.

Composición química y Calidad del agua subterránea

La composición química y calidad de las aguas subterráneas fue analizada con los resultados proporcionados por ENACAL que corresponden a los pozos UNA-ENACAL y el Pozo Exploratorio Bismarck Martínez. La muestra del pozo UNA-ENACAL fue tomada el 16 de diciembre de 2019 y la del pozo Bismarck Martínez el 25 de septiembre de 2020 (Anexo #3), además se tomaron muestras en campo al momento de la confección del Inventario de pozos en el mes de mayo del 2020 (Tabla 4.7).

Parámetros físico-químicos del agua subterránea

Temperatura (T)

La temperatura de las aguas subterráneas someras en el área de estudio varía desde 28.2 °C en el pozo #11, hasta 34.1 °C en el pozo #5 (Tabla 4.7). La Ilustración 32 muestra la distribución de las temperaturas en las aguas subterráneas del área de estudio, tienen tendencia a descender desde el extremo Sur hacia el extremo Norte. En los pozos analizados, las temperaturas varían desde 31.5 °C en el pozo exploratorio Bismarck Martínez (Ilustración 31), a 34.1 °C en el pozo UNA-ENACAL (Tabla 4.7).

pH

El pH de las aguas someras del área de estudio (Ilustración 31), varía desde 7.45 en el pozo #7, hasta 8.8 en el pozo #1 (Tabla 4.7.) La Ilustración 32

muestra la distribución del pH del agua en la superficie del área de estudio, tiene tendencia a descender desde el extremo Suroeste hacia el extremo Noreste. Todos estos datos han sido tomados en pozos con profundidades entre 3 m a 6 m, con excepción del pozo #10 del inventario (Ilustración 30). En los pozos perforados el pH del agua subterránea es prácticamente la misma, el PH en el pozo UNA-ENACAL es de 8.29, mientras que en el pozo exploratorio Bismarck Martínez es de 8.3 (ANEXO #3).

Conductividad Eléctrica (CE)

La CE de las aguas someras del área de estudio (Ilustración 31), varía desde 1,070 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pozo #5, hasta 2,060 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pozo #9 (Tabla 4.7). La Ilustración 32 muestra la distribución de las conductividades eléctricas del agua en la superficie del área de estudio, tiene un comportamiento sectorizado, en el sector Suroeste y Noreste se presentan los mayores valores, los valores más bajos están en el centro del área de estudio. En los pozos UNA-ENACAL y el exploratorio Bismarck Martínez la Conductividad Eléctrica del agua subterránea es prácticamente la misma, la CE en el pozo UNA-ENACAL es de 946 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en el pozo exploratorio Bismarck Martínez es de 878 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ANEXO #4).

Sólidos Totales Disueltos (TDS)

Las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos en las aguas subterráneas someras (Ilustración 31) oscilan entre 0.53 ppt en el pozo #1 y 1.03 ppt en el pozo #9 (Tabla 4.7). Los mismos, en las aguas profundas analizadas en los pozos UNA-ENACAL y el pozo exploratorio Bismarck Martínez van desde 0.53 ppt a 0.56 ppt respectivamente (ANEXO #3). La Ilustración 32 muestra la distribución de los Sólidos Totales Disueltos, describe un movimiento preferencial en aumento de Sur a Norte.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

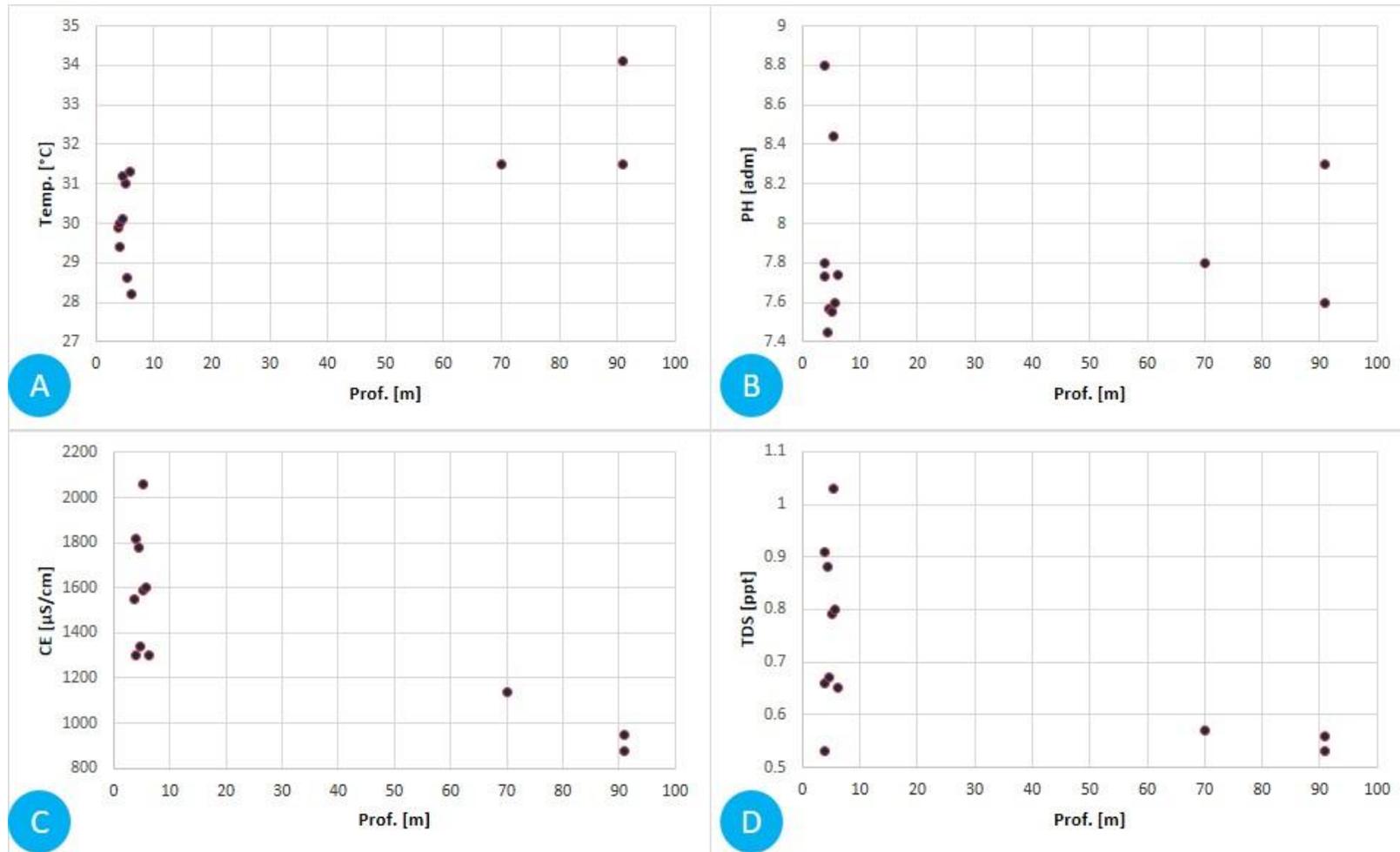


Ilustración 31. A) Temperaturas vs profundidades; B) pH vs profundidades; C) CE vs profundidades; D) TDS vs profundidades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos en la confección del inventario de pozos en el mes de mayo.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

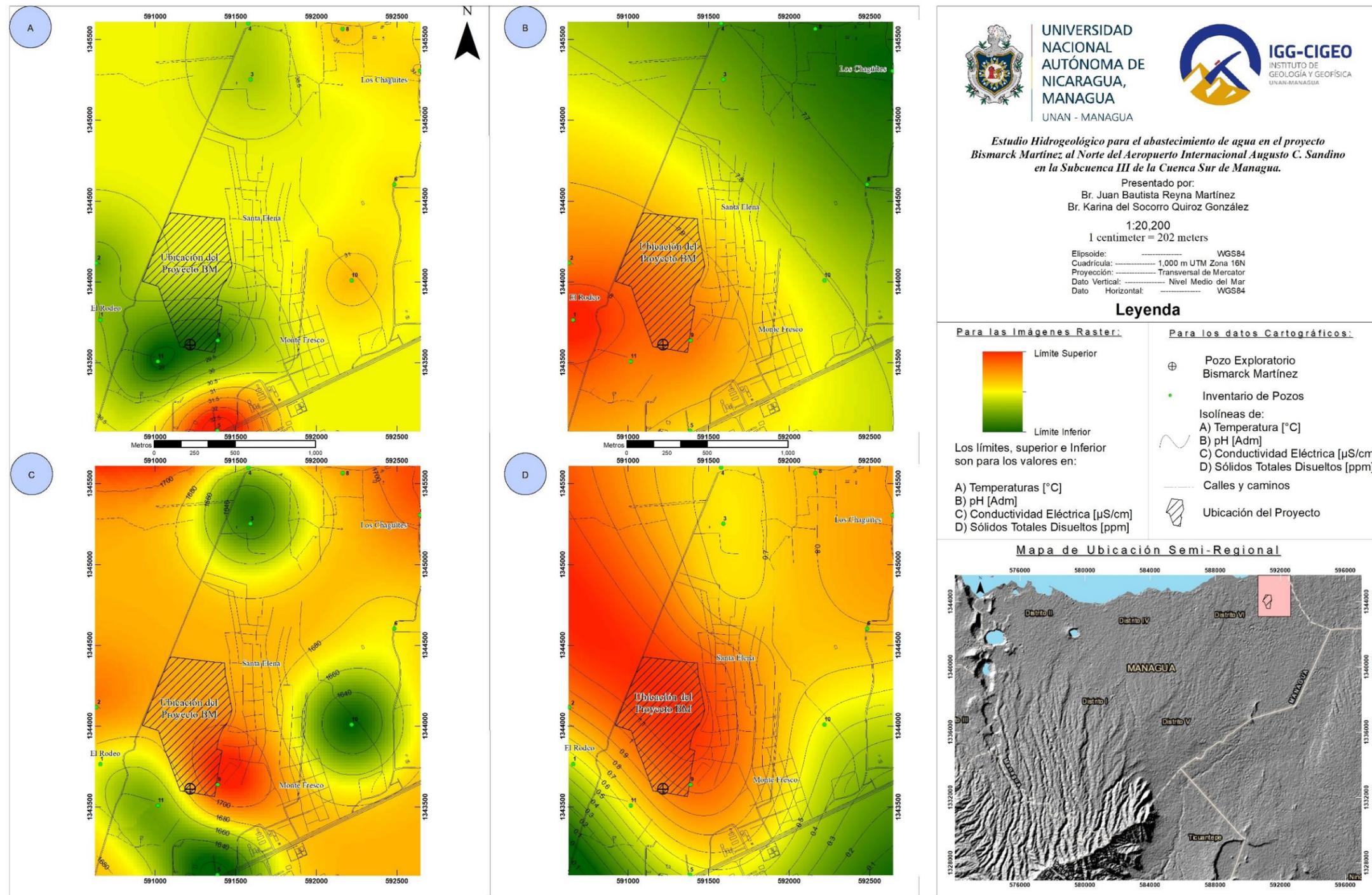


Ilustración 32. Mapa de distribución de parámetros tomados al momento del inventario de pozos. A) Temperatura [°C], B) pH [Adm], C) Conductividad Eléctrica [μS/cm], D) Sólidos Totales Disueltos [ppm] Fuente: elaboración propia con datos obtenidos en la confección del inventario de pozos en el mes de mayo.

Tipo hidroquímico

En la Ilustración 34 se muestra la representación por medio de un diagrama de Piper de las características aniónicas y catiónicas del agua subterránea en el área de estudio, esta ilustración muestra que los puntos están distribuidos con altos contenidos de Na^+ , K^+ y de $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$. Según esto, el tipo de agua es Bicarbonatada Sódica y Poco Salina, el cual indica un tipo de agua con un tiempo de recorrido bajo (Ilustración 33), esto se traduce como que es un flujo activo, generalmente con un recorrido corto y tiempos de permanencia de años o decenas de años.

	→ Sentido del recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero →								
Anión predominante	HCO_3^-	→	HCO_3^-	→	$\text{SO}_4^{=}$	→	$\text{SO}_4^{=}$	→	Cl^-
Catión predominante	Ca^{++}		→	Mg^{++}		→	Na^+		
	→ aumento de la cantidad de sales disueltas →								

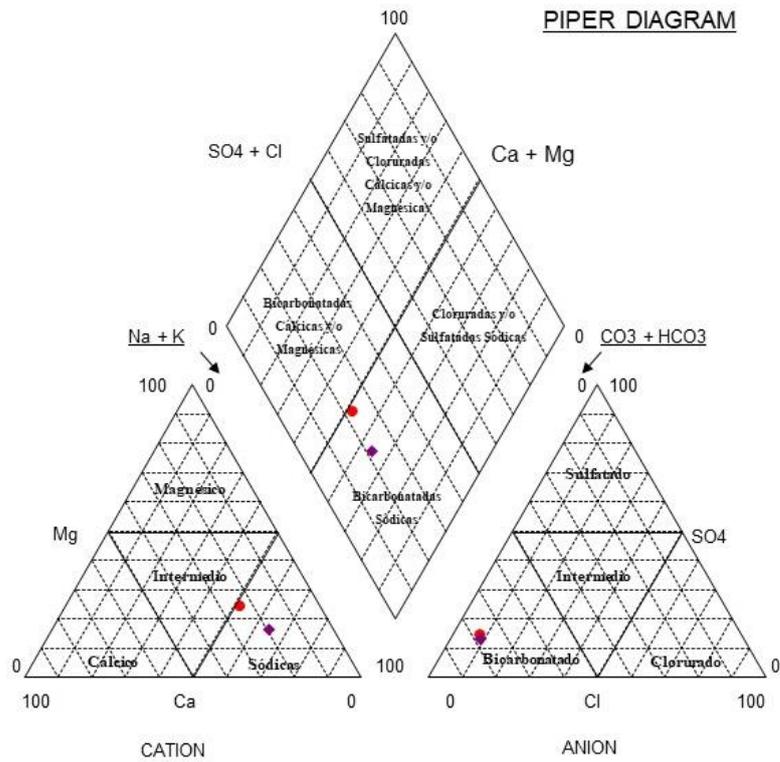
Ilustración 33. Recorrido y tiempo de permanencia de una partícula de agua en un acuífero según su evolución química. Fuente: Chevotareb, (1995) citado por Kehew, (2001)

La configuración geológica del área de estudio determina las características de las aguas someras, las que son producto de la precipitación que infiltra por considerarse aguas jóvenes (Ilustración 33), lo que corresponde al tipo hidroquímico.

En la Ilustración 35 (A) los resultados de los análisis, se localizan en un solo grupo, en general, son aguas con contenidos altos de Na^+ y HCO_3^- , estas muestras representan aguas Bicarbonatadas-Sódicas, el Cl^- y SO_4^- son los menos representados. Los resultados de las pruebas químicas también fueron ploteados en la Ilustración 35 (B), según esta, se agrupa en la clase c3-s1, Salinidad Alta – peligro bajo en Sodio (High salinity-Low Sodium hazard), lo que se traduce como que son aptas para riego.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Análisis de Resultados Físico Químico (Octubre 2020)



Leyenda

- Pozo UNA-ENACAL
- ◆ Pozo Exploratorio Bismarck Martínez

Ilustración 34. Diagrama de Piper para los análisis en los pozos perforados UNA-ENACAL y exploratorio Bismarck M. Fuente: Elaboración propia con datos facilitados por ENACAL

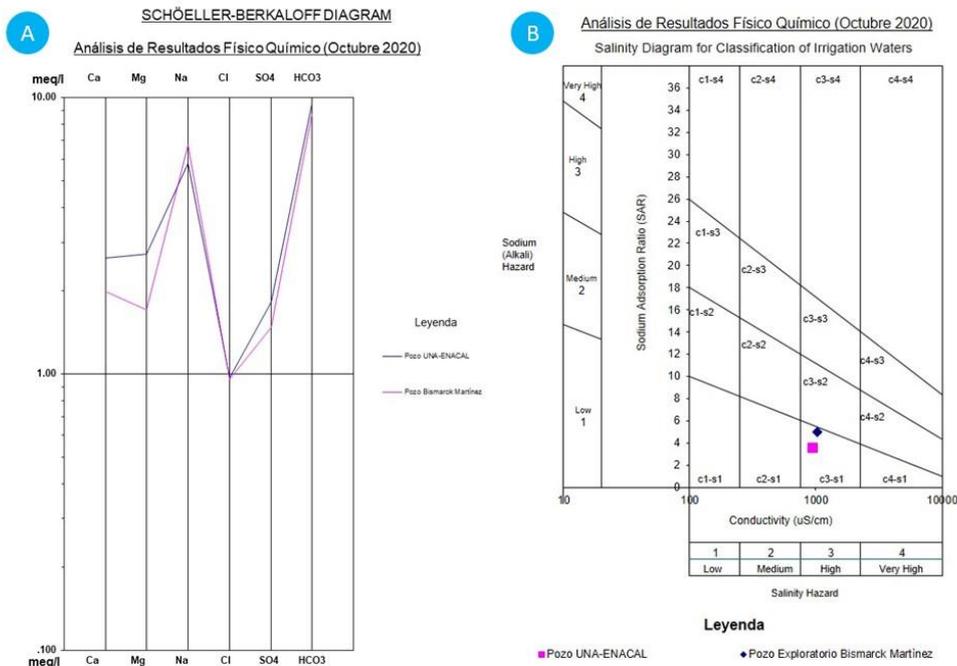


Ilustración 35. Representación de los resultados de las pruebas químicas en: A) Diagrama de Schöeller-Berkaloff; B) Diagrama de Salinidad para la clasificación de aguas para riego.

Análisis de laboratorio para los pozos profundos

Cloruro (Cl⁻)

La concentración de Cloruros en las aguas subterráneas fluctúa entre 34.02 mg/L en el pozo exploratorio Bismarck Martínez y 34.47 en el pozo UNA-ENACAL, estas variaciones no son muy marcadas.

Dureza Total

La dureza total, expresada como Carbonato de Calcio de las aguas subterráneas de la zona, se encuentra entre 184.43 mg/L en el pozo exploratorio Bismarck Martínez y 267.03 mg/L en el pozo UNA-ENACAL. Rangos de concentraciones de sólidos totales disueltos de CaCO₃ en aguas subterráneas y su dureza.

Tabla 4.11 Rangos de valores de Sólidos totales disueltos de CaCO₃ en aguas subterráneas y su dureza.

Concentración de CaCO ₃ [mg/L]	Tipo
0-60	Blanda
61-120	Moderadamente Blanda
121-180	Dura
>180	Muy Dura

Fuente: OMS, (2006)

En base a los valores de dureza total, las aguas subterráneas del área de estudio se clasifican como Muy Duras (>180 mg/L de CaCO₃ en la Tabla 4.11)

Hierro y Magnesio.

Las concentraciones de Hierro varían desde 0.39 mg/L en el pozo Exploratorio Bismarck Martínez y 0.12 mg/L en el pozo UNA-ENACAL. Las concentraciones de Magnesio varían desde 20.69 mg/L en el pozo exploratorio Bismarck Martínez y 32.86 mg/L en el pozo UNA-ENACAL.

Este alto contenido de mineral ferroso disuelto en las aguas subterráneas (reducido en forma tipo II) es soluble y normalmente no es dañino para la salud. El hierro II se oxida a tipos de hierro III que son hidróxidos insolubles en agua.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Estos compuestos corrosivos provocan bloqueos de las rejillas, tuberías y sistema de circulación en los pozos, manchas en la ropa y utensilios de cocina. El mayor problema corresponde al posible bloqueo de sistemas de distribución, la reducción del flujo del agua, olor desagradable del agua, asientos de material en fondos de recipientes. El consumo crónico de agua con altas cantidades de Fe puede conducir a una hemocromatosis, la cual es una enfermedad que daña los órganos del cuerpo y en casos extremos, puede provocar daños al corazón y al hígado (Health Canada, 2009 citado en Rubio, et al., 2015).

Tabla 4.12. Indicaciones para el ISL y ISL mejorado por Carrier.

ISL	Indicación
ISL<0	Agua no saturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO ₃). El agua no saturada posee la tendencia de eliminar láminas de carbonato cálcico (CaCO ₃) presentes que protegen las tuberías y equipos.
ISL=0	Agua considerada neutral. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de las mismas.
ISL>0	Agua supersaturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO ₃). Posible formación de incrustaciones.
ISL (Carrier)	Indicación
-2,0<ISL<- 0,5	Corrosión severa
-0,5<ISL<0	Corrosión leve, pero sin formación de incrustaciones
ISL= 0,0	Equilibrada pero posible corrosión leve
0,0<ISL<0,5	Formación leve de incrustaciones y corrosiva
0,5<LSI<2	Formación de incrustaciones, pero no corrosiva

Fuente: Modificado de Suarez, et al., (2012)

Según la ecuación 13 el cálculo del índice de Langelier es:

$$I_L = pH - pH_s$$

$$pH_s A = 9.59; pH_s B = 7.2$$

$$pH A = 8.29; pH B = 8.3$$

Entonces:

$$I_L UNA - ENACAL = 8.29 - 9.59 = \mathbf{1.3}; I_L BM = 8.3 - 7.2 = \mathbf{1.1}$$

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Tabla 4.13. Resultados del índice de Saturación de Langelier

Parámetros medidos	Pozo UNA-ENACAL	Pozo Exploratorio B.M.
Profundidad (m)	91.4	91.4
pH	8.29	8.3
Temp (°C)	34.1	31.5
Conductividad en SDT	564.16	536.85
Ca ²⁺	52.78	39.77
HCO ₃ ⁻	581.56	530.01
IL	1.3	1.1
A	El agua está sobresaturada con respecto al carbonato de calcio (CaCO ₃) y puede producirse la formación de incrustaciones.	El agua está sobresaturada con respecto al carbonato de calcio (CaCO ₃) y puede producirse la formación de incrustaciones.
B	Formación de escamas, pero no corrosivo.	Formación de escamas, pero no corrosivo.

Fuente: Elaboración propia. *A: *Indicación Langelier (1936)*, B: *Indicación Langelier mejorado por Carrier (1965)*

Calidad química de las Aguas subterráneas para fines de consumo humano

Criterios utilizados

Para los fines de uso potable, las concentraciones de ciertos minerales en el agua no deben exceder las Normas establecidas para tal fin. En el presente estudio la idoneidad de las aguas para los fines de consumo humano fue establecida utilizando como referencia las recomendaciones de la legislación nicaragüense (NTON 09 003-99), estas recomiendan el uso de normas regionales como la CAPRE, (1994). En la Tabla 4.12 y en la Tabla 4.13 se muestran los valores recomendados y máximos admisibles, así como las propiedades que reflejan los informes de los pozos UNA-ENACAL y el pozo exploratorio Bismarck Martínez.

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Tabla 4.14 Comparación de los parámetros Fisicoquímicos obtenidos en pozos del área de estudio con valores recomendados y admisibles por la norma CAPRE.

Parámetro	Unidad	Valor Recomendado	Valor Máximo admisible	PP UNA-ENACAL	PP Bismarck Martínez
Apariencia	-	-	-	Clara	Clara
Turbidez	NTU	1	5	0.30	-
Sólidos Disueltos	mg/L		1000	564.16	536.85
Temperatura	°C	18 a 30		34.1	31.5
pH	adm	6.5 a 8.5		8.29	8.30
Conductividad Elect.	μS/cm	400		946	878
Alcalinidad Total (CaCO ₃)	mg/L	N.E	N.E	476.98	434.71
Dureza Total (CaCO ₃)	mg/L	400		267.03	184.43
Sodio (Na)	mg/L	25	200	133.50	155
Calcio (Ca)	mg/L (CaCO ₃)	100		52.78	39.77
Magnesio (Mg)	mg/L (CaCO ₃)	30		32.86	20.69
Potasio (K)	mg/L		10	24.15	25.45
Hierro Total (Fe 2+)	mg/l		0.3	0.12	0.39
Bicarbonatos (HCO ₃)	mg/L	N.E	N.E	581.56	530.01
Cloruros (Cl)	mg/L	25	250	34.47	34.02
Sulfatos (SO ₄)	mg/L	25	250	87.22	70.87
Nitratos (NO ₃)	mg/l	25	50	0.40	3.16
Flúor (F)	mg/L		0.7	0.33	0.35

Fuente: Elaboración propia basado en norma CAPRE, (1994) y con información facilitada por ENACAL. *NE: no especificado en el informe

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Tabla 4.15 Comparación de resultados obtenidos de la prueba de Absorción atómica y Bacteriológicos en pozos del área de estudio con valores recomendados y admisibles por la norma CAPRE.

Análisis de Absorción Atómica					
Arsénico (As)	µg/L		10	4.87	5.73
Manganeso (Mn)	Mg/l	0.1	0.5	0.184	0.180
Zinc (Zn)	Mg/L		3	N.E	0.056
Análisis Bacteriológicos					
Coliforme Fecal	UFC/100 ml	Neg	Neg	N.E	4
Coliforme Total	UFC/100 ml	Neg	Neg	N.E	8

Fuente: Elaboración propia basado en norma CAPRE, (1994) y con información facilitada por ENACAL. *NE: no especificado en el informe

Discusión de la calidad de las aguas subterráneas

Comparando los contenidos minerales, características fisicoquímicas y bacteriológicas con la Norma Respectiva antes señalada y del análisis hidroquímico, se desprende lo siguiente:

1. Las aguas subterráneas tienen carácter químico Bicarbonato-Sódico; la concentración de Sólidos Totales Disueltos y Conductividad Eléctrica en las aguas someras, es mayor que los correspondientes a las aguas subterráneas profundas.

El carácter del tipo de agua corresponde a aguas jóvenes, sugiriendo que son aguas de recarga local. En los pozos analizados, las muestras no fueron tomadas estratificadas, pero según la Ilustración 34 la muestra del pozo UNA-ENACAL, son aguas que presentan composiciones intermedias entre Sódicas y Cálcidas, representadas por una transición entre Bicarbonatadas Sódicas – Bicarbonatadas Cálcidas y/o Magnésicas, por lo tanto, no es posible determinar el cambio entre las aguas de infiltración y las aguas de movimiento regional de descarga.

El cambio de concentraciones de Sólidos Totales Disueltos y Conductividad eléctrica entre las aguas profundas y superficiales evidencia lo antes descrito como un cambio entre aguas superficiales de recarga y aguas profundas, las que posiblemente sean producto de un flujo regional.

2. El comportamiento de las aguas subterráneas profundas analizadas en los pozos perforados y exploratorio, presentan cierta tendencia a ser incrustantes, por su contenido de CaCO_3 .

Según la Tabla 4.11 el agua está sobresaturada con respecto al carbonato de calcio (CaCO_3) y puede producirse la formación de incrustaciones, esto podría ocasionar un problema al sistema de distribución y al sistema de bombeo, además de a la calidad del agua (Araya, 2010). Estas aguas podrían producir, con el tiempo, una colmatación en las rejillas del pozo y/o en las formaciones de las que se está extrayendo el agua.

3. Dado que los parámetros de: apariencia, turbidez, Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica y las concentraciones de: CaCO_3 en Alcalinidad y Dureza Total, Sodio (Na), Calcio (Ca), Bicarbonatos (HCO_3), Cloruros (Cl), Sulfatos (SO_4), Flúor (F), se encuentran por debajo de los límites recomendados por la Norma CAPRE, desde el punto de vista mineral, las aguas subterráneas existentes en el subsuelo del área de estudio son adecuadas para usarse para consumo humano.

4. En cuanto a metales pesados como el Arsénico (As), Manganeseo (Mn) y Zinc (Zn), las aguas subterráneas pueden ser utilizadas para consumo humano.

5. Según el análisis bacteriológico de Coliformes Fecal y Total, las aguas subterráneas están sobre la norma.

6. Además, los parámetros de Magnesio (Mg), Potasio (K), Hierro Total (Fe) y Nitratos (NO_3), están sobre la Norma regional CAPRE.

Balance subterráneo para el tubo de flujo

Las Entradas estimadas totales consisten en el Caudal de flujo subterráneo de entrada (Q_e) y la Recarga potencial (R_p); las Salidas estimadas totales consisten en: bombeo para uso doméstico (B) y el Caudal de flujo subterráneo de salida (Q_s).

$$Q_e + R_p - B - Q_s = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Donde:

R_p =Recarga potencial al acuífero

Q_e = Caudal de Entrada Subterránea [$m^3/año$]

B = Extracción por Bombeo [$m^3/año$]

Q_s = Caudal de Salida Subterránea [$m^3/año$]

ΔS = Cambio de volumen almacenado en el tiempo [$m^3/año$]

Recarga potencial al acuífero

La recarga potencial al acuífero fue calculada para el área del tubo de flujo (mapa piezométrico) por medio de un balance hídrico de suelos con la metodología propuesta por Schosinsky, (2006), el área fue estimada en 0.98 km^2 , el valor de la Recarga Potencial al acuífero fue estimada en **36,390 $m^3/año$** .

Cálculo de las entradas y salidas horizontales (Q_e y Q_s):

Se planteó calcular los caudales de flujo subterráneos de entrada y salida del sistema acuífero por el método de los tubos de flujo, basado en la ecuación de Darcy (ecuación (1)), donde se tomó como base de las curvas piezométricas del área de estudio, correspondiendo a 56 m y 45 m; calculando la distancia entre las curvas para calcular el gradiente hidráulico, se utilizó el valor de Transmisividad propuesta por Krázný en 1995, mostrada en la Tabla 4.10, calculada por medio de pruebas de bombeos en pozos de la zona de Veracruz y Sabana Grande; para el área transversal será tomada en cuenta el área del flujo subterráneo, que corresponde a las distancias entre las dos líneas de flujos (Sector más ancho y angosto Ilustración 30), por el espesor observado en los pozos dentro del área de estudio (91.4 m).

Estimación de Caudal bombeado para uso doméstico (B):

Basado en el número de casas estimadas para la construcción del proyecto, el promedio de consumo doméstico per cápita por persona al día y un promedio de uso para áreas verdes se estimó el caudal que se bombeará en el futuro pozo del proyecto Bismarck Martínez. El número de casas estimadas para el proyecto por la Alcaldía de Managua es de 1,200. En cada casa, como promedio, se espera que habiten 5 personas.

Tabla 4.16. Presentación de las componentes de la Ley de Darcy

Componente	Valor
Transmisividad (T) [m ² /día]	1,000
Gradiente Hidráulico [-]	5 x 10 ⁻³
Ancho del Tubo de flujo de entrada (W) [m]	790
Ancho del Tubo de flujo de salida (W) [m]	260

Fuente: Elaboración propia. *Ancho del tubo de flujo subterráneo, calculado entre las líneas de flujos (Ilustración 30)

Tabla 4.17 Cálculo del caudal de flujo subterráneo.

Fórmula	Cálculo	Unidades
Caudal de entrada		
$Q = T * W * i$	$Q_e = (365,000)(790)(5x10^{-3})$ $Q_e = 1,441,750$ $Q_e = 1.44x10^6$	$m^3/año$
Caudal de Salida		
$Q = T * W * i$	$Q_e = (365,000)(260)(5x10^{-3})$ $Q_e = 474,500$ $Q_e = 4.75x10^5$	$m^3/año$

Fuente: Elaboración propia. *El caudal de flujo fue calculado para un área transversal correspondiente al tubo de flujo de la Ilustración 30.

La dotación que se considerará es de unos 50 L/PP/día^9 , lo que, además, será considerado un caudal adicional para áreas verdes del 20% por cada persona, que es un total de: 60 L/PP/Día . Esto es un total de $0.06 \text{ m}^3/\text{PP/día}$ - $22 \text{ m}^3/\text{PP/año}$. Según las estimaciones anteriores, lo que las 1,200 casas con un promedio de 5 habitantes cada una consumirán anualmente será: **132,000 $\text{m}^3/\text{año}$** .

Tabla 4.18. Balance de Aguas Subterráneas

Entradas $\text{m}^3/\text{año}$		Salidas $\text{m}^3/\text{año}$	
R_p	36,389.9	B	132,000
Q_e	1.44×10^6	Q_s	4.75×10^5
Total	1,476,389.9	Total	607,000
$\frac{\Delta S}{\Delta t}$	$\frac{\Delta S}{\Delta t} = 1,476,389.9 - 607,000 =$		869,389.9

Fuente: Elaboración propia. El área considerada para este balance subterráneo es la del tubo de flujo en la Ilustración 30.

Rendimiento Sostenible y su aprovechamiento

El sistema de aguas subterráneas del área de estudio es caracterizado como “Desarrollado”, está en estado no estacionario con un bombeo proyectado “moderado” a una profundidad fija.

Basado en estas características de la cuenca subterránea y según la demostración de Maimone (2004), que el rendimiento sostenible debe incluir una aproximación holística y no definiendo un número único, y en el argumento de Devlin y Sophocleous (2005) en el que se evidencia que la recarga al acuífero en zonas de captura reducida no es indispensable para la estimación del bombeo sostenible, el rendimiento sostenible para este estudio ha sido modelado por medio de un balance hídrico subterráneo en un tubo de flujo, para cuantificar las aguas de las que se dispone en la explotación del futuro pozo, en otras palabras, el rendimiento sostenible fue estimado según las condiciones hidrogeológicas locales.

⁹ Litros por persona al día

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Según el Balance de hídrico subterráneo presentado para un tubo de flujos en este estudio (Ilustración 30), la recarga potencial al acuífero por medio de percolación local es muy pequeña en comparación al Caudal de entrada y salida del mismo (Tabla 4.18). La recarga potencial es de $2,775.9 \text{ m}^3/\text{año}$ y los caudales de entrada y salida son $1.44 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ y $4.75 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{año}$ respectivamente. Además, considerando que el futuro pozo estará captando agua (mayormente) del flujo regional, las recargas locales no son significativas para la estimación de la sostenibilidad del bombeo.

Basado en las aseveraciones expuestas anteriormente y en los cálculos presentados, se recomienda que el valor de explotación de las aguas subterráneas no exceda la cantidad de agua disponible en el tubo de flujo, representada por el caudal de salida al Lago Xolotlán.

Según las estimaciones hechas para la extracción futura del pozo para abastecimiento de agua en el Proyecto Bismarck Martínez, el caudal es de $132,000 \text{ m}^3/\text{año}$, lo que equivale a 27% del volumen de salida al Lago.

Modelo hidrogeológico conceptual

Unidades Hidro-estratigráficas

Las formaciones acuíferas principales en el área de estudio son dos: El Grupo Volcánico Masaya y La Formación Las Sierras Medio. Estos depósitos poseen una alta capacidad de rendimiento, como lo describe JICA (1993), con abatimientos menores a los 3 metros y altas capacidades específicas (1,118.64 m³/día/m).

Grupo Volcánico Masaya (QvM)

El acuífero contenido en este Grupo, está en flujos de lavas basálticas-andesíticas porosas, depósitos de flujos piroclásticos permeables que constan, principalmente, de materiales con buenas permeabilidades por su alta porosidad.

La Formación Las Sierras Medio (TQpS-M)

Esta formación es capaz de producir grandes cantidades de agua provenientes de las capas porosas permeables: Flujos de piroclastos, depósitos de caída de escoria, zonas con suelos fósiles y las zonas de fracturas presentes en los aglomerados basálticos-andesíticos compactos, tobas Brechosas y Tobas. Esta formación, que agrupa gran cantidad de capas porosas y fracturadas permeables.

Las capas calificadas como Suelos Fósiles (SF) no se consideran como acuíferos por su contenido de arcilla, poco espesor y por la falta de información de sus propiedades hidráulicas, por lo último descrito, estas capas tampoco son consideradas como confinantes para las otras unidades hidro-estratigráficas.

Todas las capacidades antes descritas para cada unidad hidro-estratigráfica, dependen del grado de compactación, contenido de arcillas y cenizas volcánicas, granulometría y carácter de extensión, horizontal y vertical.

Las diferencias hidro-estratigráficas para el modelo presentado en el presente estudio, son consideradas como dos: 1) Diferencias litológicas, que tendrían consecuencias directas en la porosidad, por lo tanto, en las propiedades hidráulicas; 2) Diferencias de espesor o potencia estratigráfica.

Disposición y Espesor de las Capas Acuíferas

De la presentación de la columna lito-estratigráfica, la interpretación de pozos de las cercanías, de las tomografías eléctricas y registro eléctrico de pozo correspondientes al área de estudio, se concluye:

En el área estudiada para el presente estudio, se han reconocido 2 capas acuíferas, con espesores desde los 10 hasta 130 metros de profundidad (Ilustración 36), separados por dos capas de Suelos Fósiles (Arenas y arcillas) de unos 10 metros cada uno (Ilustración 19). En este sector, las mejores capas acuíferas son dos y se localizan entre el nivel estático (56 m.s.n.m. en el mapa piezométrico) y los 40 metros de profundidad (Ilustración 19), tramo que corresponde a los depósitos del Grupo Volcánico Masaya. La segunda capa potencialmente acuífera, cuenta con mayor espesor, que corresponde a la Formación Las Sierras Medio, se ubica entre los 50 metros y los 130 metros de profundidad (Ilustración 19).

Espesor Total

Hasta el momento el pozo exploratorio JI-3 hecho por JICA, (1993), ha interceptado rocas que pudieran considerarse como parte constituyente del basamento del acuífero Las Sierras. Esta perforación, localizada en las inmediaciones de Sabana Grande, fue hecha con fines de reconocimiento estratigráfico, de las especies y calidades de las aguas subterráneas, las características hidráulicas y confirmar la capa basal e investigar la situación geotérmica.

La perforación señalada, confirmó a los 266-366 metros de profundidad el Grupo Coyol, compuesta de Ignimbrita Dacítica meteorizada color café. Por medio de sondeos eléctricos verticales se supuso que subyaciendo al Grupo Coyol se encuentran Formaciones más antiguas de origen sedimentario como la Formación el Salto y otros sedimentos terciarios consideradas por sus propiedades hidrogeológicas como las formaciones basales del acuífero.

De los antecedentes arriba expuestos, se desprende que el verdadero espesor de las capas acuíferas de la zona y la configuración del fondo sobre el cual descansa, aún no son muy bien conocidas. Para este estudio, el espesor total del sistema acuífero será el espesor total de la lito-estratigrafía presentada en la Ilustración 19, que consta de 130 metros.

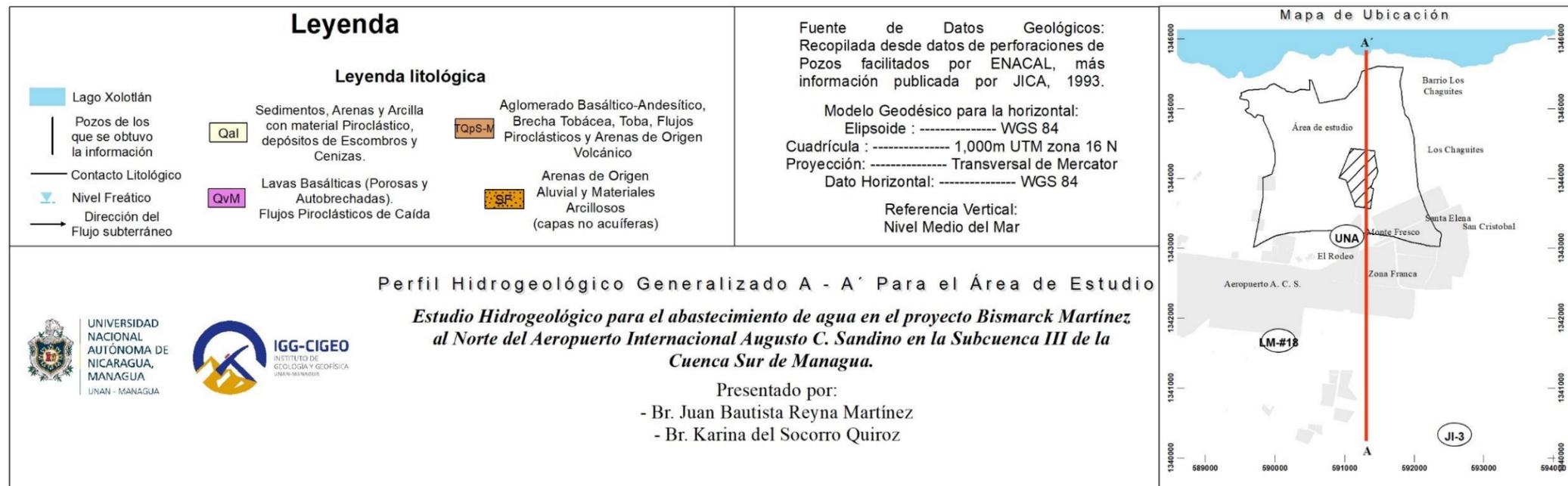
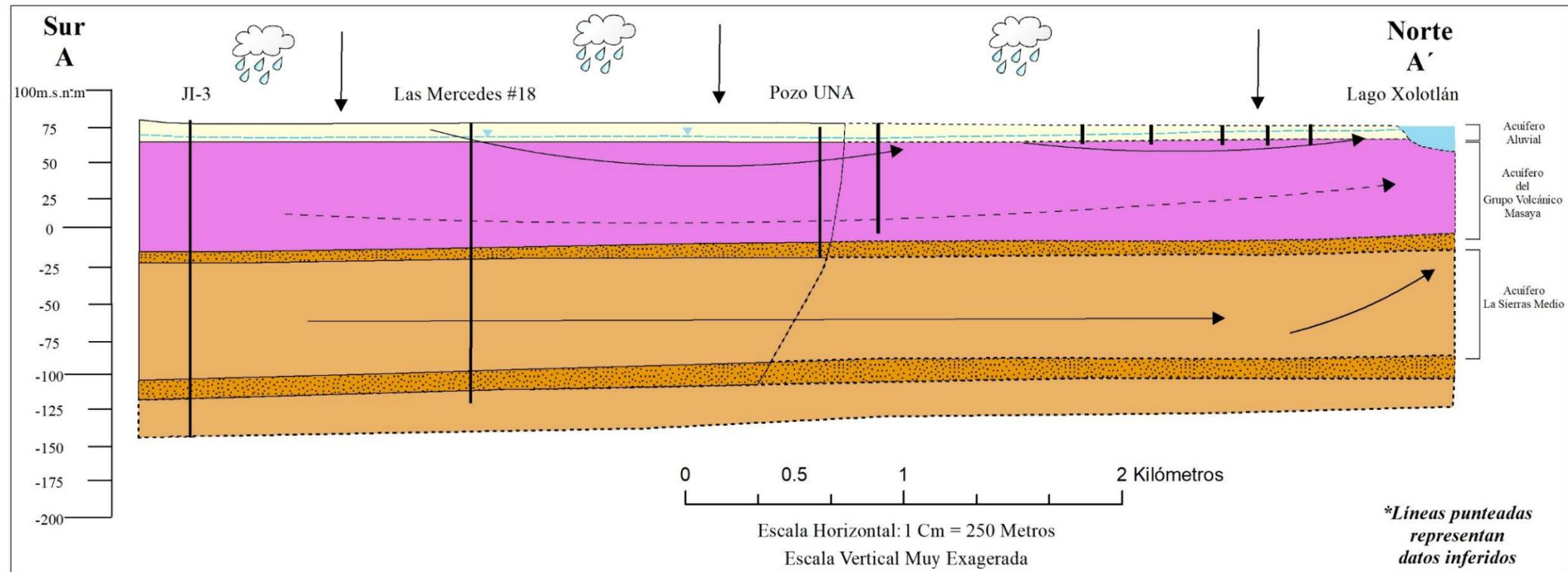


Ilustración 36. Perfil Hidrogeológico Generalizado para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5 CONCLUSIONES

Según el análisis de los resultados de la presente investigación, se desprenden las siguientes conclusiones:

- 1) El área de estudio está asentada sobre materiales Aluviales, rocas de origen volcánico, en las que se encuentran las dos principales formaciones, Grupo volcánico Masaya y Formación Las Sierras Medio. En el área del futuro proyecto a pesar que es una zona con muchos lineamientos y fallas, no se ha confirmado la presencia de ningún indicativo dentro del perímetro. La configuración de la superficie freática de la zona (desde 56 m.s.n.m a 45 m.s.n.m) se comporta con líneas equipotenciales paralelas al Lago Xolotlán, y el flujo perpendicular a las orillas, lo que indica descarga en el mismo.

Se reconocieron dos capas hidro-estratigráficas que funcionan como acuífero, El Grupo Volcánico Masaya y La Formación Las Sierras Medio las que poseen altas capacidades específicas (1,118.64 m³/día/m). La disposición de estas capas es horizontal, el espesor total es la lito-estratigrafía presentada (130 m), considerando las profundidades presentadas por JICA (1993), se supone que el acuífero de Las Sierras profundiza hasta más de los 300 metros.

- 2) De la comparación de los análisis de laboratorio disponibles con la norma establecida en la legislación nicaragüense, se concluye que, en el acuífero las concentraciones de minerales, están casi siempre por debajo de los límites recomendados o permitidos, por lo tanto, son aguas consumibles, pero necesitan ser tratadas por valores elevados de Hierro, Magnesio y Coliformes Totales.

- 3) Se ha determinado que el caudal proyectado de extracción no perjudicará las reservas del acuífero, por lo tanto, se considera que el bombeo es sostenible. Esto porque el caudal estimado para el bombeo es mucho menor que el caudal de flujo subterráneo de salida. La construcción de un pozo de abastecimiento es factible en el área estudiada, por calidad y por extracción.

5.2. RECOMENDACIONES

- 1) Si la extracción en los próximos años aumenta, deberá hacerse respetando lo indicado en la sección correspondiente al “Rendimiento Sostenible”. Donde se deberá analizar el incremento de la extracción del agua subterránea, revisando los efectos de las extracciones sobre los niveles del agua subterránea después de varios años de historia operacional y los radios de influencia, tomando en consideración que el Bombeo deberá siempre estar por debajo del Rendimiento Sostenible del Acuífero, en el que se ha considerado el valor del Caudal Subterráneo de Salidas ($Q_s = 4.75 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{año}$) como extracción máxima recomendada.

- 2) Tomando en consideración que las aguas subterráneas del área presentan ciertas tendencias a ser incrustantes, se sugiere emplear rejillas fabricadas de material resistente a la corrosión, por si requerir aplicar un proceso de rehabilitación química por los depósitos minerales precipitados en la superficie de las rejillas y en los poros de la formación adyacente, los que deberán ser removidos con agentes químicos y/o cepillados.

- 3) Realizar pruebas de bombeo del tipo descarga constante y de abatimiento-recuperación, aún no ejecutadas en el pozo exploratorio Bismarck Martínez. Las pruebas de descarga variable permitirán establecer mejor la eficiencia del pozo y obtener la información necesaria para seleccionar el equipo de bombeo definitivo. Con las descargas constantes se calculará la Transmisividad y el Coeficiente de Almacenamiento

4) Se sugiere establecer un muestreo sistemático y estratificado de la calidad química de las aguas subterráneas, para observar posibles cambios en la calidad de las aguas del área, según la variación estacional anual. Para cuantificar el volumen de agua extraído del acuífero, se debe llevar un control, lo más preciso posible, del caudal del equipo de bombeo instalado según lo que establecen las Normas nicaragüenses en cada caso.

5) Se recomienda que la ubicación del pozo de extracción para el futuro proyecto sea en el punto de referencia (Anexo #4) con coordenadas Norte: 591337.7 y Este: 1343700.6 ya que las condiciones hidrogeológicas son apropiadas, para lo anterior se han considerado factores como: la estratigrafía, la que ha sido contrastada con las tomografías eléctricas, la calidad del agua, y la pendiente de la zona que, a pesar de ser muy baja, si existe tendencia a disminuir hacia el norte.

6) En el Anexo #5 se muestra la propuesta de ubicación de las Rejillas del pozo de extracción, la propuesta se realizó únicamente considerando las características hidro-estratigráficas y analizando los resultados del registro eléctrico de pozos. La longitud total de las rejillas podrá extenderse en La Formación Las Sierras Medio según la profundidad proyectada del pozo.

5.3. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 298(0).
- Araya, R. A. (2010). ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ACERO GALVANIZADO EXPUESTO A UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA POTABLE.
- Astier, J. L. (1975). *Geofísica Aplicada a la Hidrogeología* (Vol. 8). España: AST.
- Auge, M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea*. Buenos Aires.
- Avellán, D. R. (2009). *Tefroestratigrafía de la Parte Occidental de Managua, Nicaragua: Evolución de las Estructuras Volcánicas de Ticomo, Nejapa y Asososca*.
- Barrera Suárez, T. A. (2012). Modelamiento de la formación de scale del agua de producción del Campo Castilla.
- Bice, D. (1980). *Tephra stratigraphy and physical aspects of recent volcanism near Managua*. Managua, Nicaragua: Unpublished Ph.D. thesis, Univ. of Berkeley, California, 422 pp.
- Cantos Figuerola, J. (1974). *Tratado de Geofísica Aplicada*. Madrid.
- Capilla, M. S. (2014). *Comparación de técnicas geofísicas para determinación de contaminación de suelos agrícolas*. Madrid.
- CNA. (2007). *Prospección Geoeléctrica y registro Geofísico de pozos*. Mexico.
- Cowan, H. P. (2002). Late holocene earthquakes on the aeropuerto fault, Managua, Nicaragua. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(5), 1694-1707.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2006). Multiple-gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*.
- De Sousa, C. C. (2010). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. *Boletín de malariología y salud ambiental*, 50(2), 187-196.
- DeMets, C. (2001). *A New Stimate for Present-Day Cocos-Caribbean Plate Motion: Implications for Slip Along the Central American Volcanic Arc* (Vol. 21). Geophysical Research Letters,.
- Denyer, P. (2008). *Geología y Geotectónica de América Central y el Caribe*. Lima, Perú: Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. Ponencia presentada en el Congreso Latinoamericano de Geología.
- Díaz Anaya, E. P. (2010). *Implementación del código Zondres2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*. México.
- Escorza, M. (2010). *Magnetometría de la isla del Socorro, Archipiélago de las Revillagigedo*. México.
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*.
- Fetter, C. W. (2014). *Applied hydrogeology* (Fourth Edition ed.). Harlow: Pearson Education Limited.
- Fitts, C. R. (2002). *Groundwater science*. Elsevier.
- Freund, R. (1974). Kinematics of transform and transcurrent faults. *Tectonophysics*, 21, 93–134.

- Frischbutter, A. (2002). *Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images*. Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Garayar, L. J. (1977). Investigación Geológica de la Falla Las Mercedes. *Publicación N°5-77, Managua, D. N. Nicaragua*, pp. 25.
- García, R. F. (2018). *Apuntes sobre captación de agua subterránea*. Buenos Aires.
- Girard, G. &. (2005). The Managua Graben and Las Sierras-Masaya volcanic complex (Nicaragua); pull-apart localization by an intrusive complex: results from analogue modeling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37-57.
- González, C. M. (2012). *Caracterización Geológica y Efecto de Sitio en el Graben Aeropuerto, Managua*.
- GWP. (2016). *Gestión integrada de los recursos hídricos en Centroamérica: gestionando las aguas transfronterizas como desafío primordial*.
- HERAS, R. (1972). *Manual de hidrología, Hidrología agrícola*. Madrid, España.: Esc. Hidrología.
- Hodgson, G. (2000). *Geología Regional de Nicaragua, Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua*. Managua.
- INETER. (2014). *Cuencas Hidrográficas de Nicaragua bajo la Metodología Pfafstetter*. Managua.
- INIDE. (2017). *Anuario Estadístico*. Managua: Instituto Nacional de Información de Desarrollo. Obtenido de www.inide.gob.ni
- JICA-INAA. (1993). *Estudio Sobre el Proyecto de Abastecimiento de Agua en Managua*. Tokio: Kokusai Kogyo Co., Ltd.
- Jiménez, E. P. (2015). *Caracterización mediante Tomografía Eléctrica del deslizamiento de Toleo (Oviedo)*. Oviedo.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2003). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Gran Bretaña: Blackwell Science.
- Koefoed, O. (1979). *Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurements*. Amsterdam: ESPC.
- Kruseman, G. P. (1994). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Kuang, J. (1971). *Geología de la Costa del Pacífico de Nicaragua: . Managua: Catastro e Inventario de Recursos Naturales*. Open File Report No. 3.
- La Femina, P. C. (2002). *Bookshelf Fulfilling In Nicaragua:.* Geological Society of America, V. 30, N° 8, P. 751-754.
- Loke M. H., B. R. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *SEG*.
- Loke, M. (1999). *RES2DINV ver.3.4. Rapid 2-D Resistivity and IP inversion using the least-squared method, ABEM instrument, user manual*.
- Looke, M. H. (2002). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*.
- López Hidalgo, A., Loke, M., Fanton, G., & Rubí, E. (2012). *Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D)*.
- M. H. Loke, R. D. (1996). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *EAGE*.
- Martínez, M. (2012). *Análisis Morfoestructural del graben de Managua y sus alrededores*. Managua: UNAN.

- McBirney, A. R. (1965). *Volcanic history of Nicaragua*. Univ. de Calif. Publ. Geol. Sci.
- Nettleton, L. L. (1940). *Geophysical prospecting for oil*. New York: Mc Graw Hill.
- ONU. (1972). *Manual de instrucciones, estudios hidrológicos*. San José, Costa Rica: ONU Publ. N° 70.
- OPS y OMS. (2015). *Boletín Informativo: El Agua*. Obtenido de https://www.paho.org/nic/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=datos-y-estadisticas&alias=716-boletin-informativo-el-agua&Itemid=235
- Orellana, E. (1972). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. Madrid: Paraninfo.
- Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas* (2ª edición ed.). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Peacock, S. M. (2005). *Thermal Structure of Costa Rica - Nicaragua*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 149 (1-2), 187-200.
- Ponce, V. (2007). Sustainable Yield of ground Water.
- Ponce, V. M. (2007). Sustainable yield of groundwater. *California Department of Water Resources*.
- Rodríguez, M. G. (2013). Estimación de la Infiltración del Agua de Lluvia con Permeámetro de Guelph. *Revista Electrónica de Medioambiente. UCM. ISSN 1886-3329*, 11-21.
- Rubio, H. O. (2015). Niveles de contaminación del agua potable en la cabecera municipal de Ascención, Chihuahua, México. *Nova scientia*, 7(14), 178-201.
- Sampieri, R. &. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta Edición ed. ed.). DF México: Mc Graw Hill.
- Sanchez, J. (s.f.). *USAL.ES*. Obtenido de <http://web.usal.es/javisan/hidro>
- Schlumberger, C. (1920). *Study of Underground Electrical Prospecting*. Paris.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34-35, 13-30.
- Schosinsky, Losilla, G. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*.
- Sebesta, J. (1997). *Dynamic Development of the relief in the Managua Area, Nicaragua*. Acta Univ. Carol., Geogr. 2, 93–109.
- Singhal, B. B. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Springer Science & Business Media.
- Tellez, C. R. (2011). *Tectónica Activa en la Cuenca de Managua: Paleosismicidad de la Falla Cofradía*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- Van Wyk de Vries, B. (1993). *Tectonics and Magma Evolution of Nicaragua Volcanic Sistem*. U.K: Department of Earth Sciences, The Open University.
- Voudouris, K. (2006). Groundwater Balance and Safe Yield of the coastal aquifer system in NEastern Korinthia, Greece. *Applied Geography*, 26, 291–311.
- Walker, J. A. (1984). Volcanic rocks from the Nejapa and Granada cinder cone alignments, Nicaragua, Central America. *J. Petrol.*, 25, 299-342.
- Weyl, R. (1980). Geology of Central America. *Geb. Borntraeger*, 371.
- Woodward, C. y. (1975). *Investigation of active faulting in Managua, Nicaragua and vicinity*. Oakland, CA.: Final reportto Vice Ministerio de Planificación

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Urbana, Gobierno de la República de Nicaragua, Woodward–Clyde Associates.

Zhou, Y. (2006). A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology*, 370(1-4), 207-213.

ANEXOS

Anexo #1:
**Pruebas de infiltración con el Permeámetro
de Guelph**

Tabla 5.1. Ensayo de Permeabilidad con el Permeámetro de Guelph #1 para el área de estudio.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

Ensayo de permeabilidad Con el Permeámetro Guelph
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
Instituto de Geología y Geofísica
IGG - CIGEO / UNAN - Managua
Área de Hidrogeología



IGG-CIGEO
INSTITUTO DE
GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA
UNAN-MANAGUA

Proyecto	Bismarck Martínez / Tesis Juan Reyna - Karina Quiroz						Localización	Monte Fresco					
Fecha	14/Mayo/2020						Operador	Juan Reyna					
Equipo	Permeámetro Guelph						Tipo de suelo	Arenoso					
Coordenadas	X	591211.32				Y	1343624.15		Z	60			
Observaciones	Se hizo la prueba en una calicata de 1.60 m de profundidad, directamente en el tercer estrato												
Tabla para la lectura de agua en el pozo				Carga #1:	5		Tabla para la lectura de agua en el pozo				Carga:	10	
Numero de Lectura	Tiemp [min]	Intervalo de tiemp [min]	Nivel del Agua en el Reservorio [cm]	Cambio en el Nivel del Agua [cm]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/min]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/s]	Numero de Lectura	Tiemp [min]	Intervalo de tiemp [min]	Nivel del Agua en el Reservorio [cm]	Cambio en el Nivel del Agua [cm]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/min]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/s]
1	0		0.00				1	0		0.00			
2	2	2.00	5.00	5.000	2.500	0.042	2	1	1.00	4.00	4.00	4.000	0.067
3	4	2.00	8.00	3.000	1.500	0.025	3	2	1.00	5.00	1.00	1.000	0.017
4	6	2.00	8.40	0.400	0.200	0.003	4	3	1.00	6.30	1.30	1.300	0.022
5	8	2.00	8.80	0.400	0.200	0.003	5	4	1.00	8.00	1.70	1.700	0.028
6	10	2.00	9.30	0.500	0.250	0.004	6	5	1.00	8.60	0.60	0.600	0.010
7	12	2.00	9.80	0.500	0.250	0.004	7	6	1.00	10.00	1.40	1.400	0.023
8	14	2.00	10.30	0.500	0.250	0.004	8	7	1.00	11.00	1.00	1.000	0.017
9	16	2.00	10.70	0.400	0.200	0.003	9	8	1.00	12.20	1.20	1.200	0.020
10	18	2.00	11.20	0.500	0.250	0.004	10	9	1.00	13.30	1.10	1.100	0.018
11	20	2.00	11.50	0.300	0.150	0.003	11	10	1.00	14.30	1.00	1.000	0.017
12	22	2.00	12.10	0.600	0.300	0.005	12	11	1.00	15.30	1.00	1.000	0.017
13	24	2.00	12.67	0.567	0.283	0.005	13	12	1.00	16.50	1.20	1.200	0.020
14	26	2.00	13.40	0.733	0.367	0.006	14	13	1.00	17.50	1.00	1.000	0.017
15	28	2.00	14.10	0.700	0.350	0.006	15	14	1.00	18.70	1.20	1.200	0.020
16	30	2.00	15.00	0.900	0.450	0.008	16	15	1.00	19.70	1.00	1.000	0.017
17	32	2.00	16.00	1.000	0.500	0.008	17	16	1.00	20.70	1.00	1.000	0.017
				R1	Media	0.007					R2	Media	0.018
					Moda	0.004						Moda	0.017
					Mediana	0.008						Mediana	0.017

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.2. Presentación de la permeabilidad del suelo para el área de estudio para el ensayo #1

Método de las dos Cargas

Tipo de reservorio (introduzca "1" para combinado y "2" para reservorio interno):	1
Introduzca la primera carga de agua ("H1" en cm):	5
Introduzca la segunda carga de agua ("H2" en cm):	10
Introduzca el radio del hueco ("a" en cm):	3
Introduzca la categoría de la textura-estructura del suelo (uno de los números de abajo):	2
<p>1. <u>Materiales compactos, sin estructura, arcillosos o limosos, como tapas o revestimientos sanitarios, sedimentos lacustres o marinos, etc.</u></p> <p>2. <u>Suelos con textura fina (arcillosos o limosos) y no estructurados; también puede incluir algunas arenas finas.</u></p> <p>3. <u>Suelos más estructurados desde arcillas hasta margas; también incluye arenas finas y medias no estructuradas. La categoría más frecuentemente aplicable para suelos agrícolas.</u></p> <p>4. <u>Arena gruesa y grava; también puede incluir algunos suelos altamente estructurados con grietas grandes y / o numerosas, macroporos, etc.</u></p>	
	$\alpha^* = 0.04 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
Tasa de cambio del nivel de agua en estado estable ("R1" en cm/min):	0.0072
Tasa de cambio del nivel de agua en estado estable ("R1" en cm/min):	0.0178
	$Q_1 = 0.004239$
	$Q_2 = 0.010436$
	$c_1 = 0.842059$
	$c_2 = 1.290234$
	$G_1 = 0.005197$
	$G_2 = 0.003981$
	$G_3 = 0.058806$
	$G_4 = 0.024517$
	$K_{fs} = 1.95E-05 \text{ cm/sec}$
	$1.17E-03 \text{ cm/min}$
	$1.95E-07 \text{ m/sec}$
	$4.61E-04 \text{ inch/min}$
	$7.68E-06 \text{ inch/sec}$
	$\Phi_m = -6.54E-06 \text{ (cm}^2\text{/min)}$
Res Type: 35.22	
H1/a: 1.666667	
H2/a: 3.333333	
C1-0.01: 0.809485	
C2-0.01: 1.21841	
C1-0.04: 0.842059	
C2-0.04: 1.290234	
C1-0.12: 0.803154	
C2-0.12: 1.287543	
C1-0.36: 0.803154	
C2-0.36: 1.287543	

Tipo de Suelo	Limo
Grado de Permeabilidad	Baja
Kfs not a dec	0.00117
Kfs mm/día	16.862
Media	21.14
Kfc_Guelph: mm/día	0.0884

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.3. Ensayo de Permeabilidad con el Permeámetro de Guelph #2 para el área de estudio.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA, MANAGUA UNAN - MANAGUA		Ensayo de permeabilidad Con el Permeámetro Guelph Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua Instituto de Geología y Geofísica IGG - CIGEO / UNAN - Managua Área de Hidrogeología					 IGG-CIGEO <small>INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA UNAN-MANAGUA</small>						
Proyecto	Bismarck Martínez					Localización	BM						
Fecha	17/ 06 / 2020					Operador	Juan y Karina						
Equipo						Tipo de suelo	Aneras (suelo resiente)						
Coordenadas	X	591206			Y	1343709		Z	52				
Observaciones													
Tabla para la lectura de agua en el pozo				Carga #1:	5	Tabla para la lectura de agua en el pozo				Carga:	10		
Numero de Lectura	Tiemp [min]	Intervalo de tiemp [min]	Nivel del Agua en el Reservorio [cm]	Cambio en el Nivel del Agua [cm]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/min]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/s]	Numero de Lectura	Tiemp [min]	Intervalo de tiemp [min]	Nivel del Agua en el Reservorio [cm]	Cambio en el Nivel del Agua [cm]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/min]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/s]
Inicio	12:34		0.00				Inicio	12:56		0.00			
1	1	1.00	6.50	6.500	6.500	0.108	1	1	1.00	11.00	11.00	11.000	0.183
2	2	1.00	9.50	3.000	3.000	0.050	2	2	1.00	16.20	5.20	5.200	0.087
3	3	1.00	13.00	3.500	3.500	0.058	3	3	1.00	21.20	5.00	5.000	0.083
4	4	1.00	16.00	3.000	3.000	0.050	4	4	1.00	26.00	4.80	4.800	0.080
5	5	1.00	19.00	3.000	3.000	0.050	5	5	1.00	30.50	4.50	4.500	0.075
6	6	1.00	22.00	3.000	3.000	0.050	6	6	1.00	35.20	4.70	4.700	0.078
7	7	1.00	25.00	3.000	3.000	0.050	7	7	1.00	40.00	4.80	4.800	0.080
8	8	1.00	28.00	3.000	3.000	0.050	8	8	1.00	44.50	4.50	4.500	0.075
9	9	1.00	30.50	2.500	2.500	0.042	9	9	1.00	49.00	4.50	4.500	0.075
10	10	1.00	33.50	3.000	3.000	0.050	10	10	1.00	53.50	4.50	4.500	0.075
11	11	1.00	36.00	2.500	2.500	0.042	11	11	1.00	58.00	4.50	4.500	0.075
12	12	1.00	39.00	3.000	3.000	0.050	12	12	1.00	62.50	4.50	4.500	0.075
13	13	1.00	42.00	3.000	3.000	0.050	13	13	1.00	67.00	4.50	4.500	0.075
14	14	1.00	45.00	3.000	3.000	0.050	14	14	1.00	71.50	4.50	4.500	0.075
15	15	1.00	47.50	2.500	2.500	0.042	15	15	1.00	76.00	4.50	4.500	0.075
16	16	1.00	50.50	3.000	3.000	0.050							
17	17	1.00	53.50	3.000	3.000	0.050							
				R1	Media	0.048					R2	Media	0.075
					Moda	0.050						Moda	0.075
					Mediana	0.050						Mediana	0.075

Fuente: Elaboración Propia.

Método de las dos Cargas

Tipo de reservorio (introduzca "1" para combinado y "2" para reservorio interno):	1
Introduzca la primera carga de agua ("H1" en cm):	5
Introduzca la segunda carga de agua ("H2" en cm):	10
Introduzca el radio del hueco ("a" en cm):	3
Introduzca la categoría de la textura-estructura del suelo (uno de los números de abajo):	3

1. Materiales compactos, sin estructura, arcillosos o limosos, como tapas o revestimientos sanitarios, sedimentos lacustres o marinos, etc.

2. Suelos con textura fina (arcillosos o limosos) y no estructurados; también puede incluir algunas arenas finas.

3. Suelos más estructurados desde arcillas hasta margas; también incluye arenas finas y medias no estructuradas. La categoría más frecuentemente aplicable para suelos agrícolas.

4. Arena gruesa y grava; también puede incluir algunos suelos altamente estructurados con grietas grandes y / o numerosas, macroporos, etc.

$\alpha^* =$	0.12	(cm ⁻¹)
Tasa de cambio del nivel de agua en estado estable ("R1" en cm/min):	0.0479	
Tasa de cambio del nivel de agua en estado estable ("R1" en cm/min):	0.0750	
$Q_1 =$	0.028127	
$Q_2 =$	0.044025	
$c_1 =$	0.803154	
$c_2 =$	1.287543	
$G_1 =$	0.004956	
$G_2 =$	0.003972	
$G_3 =$	0.055692	
$G_4 =$	0.024148	
$K_{fs} =$	3.55E-05	cm/sec
	2.13E-03	cm/min
	3.55E-07	m/sec
	8.38E-04	inch/min
	1.40E-05	inch/sec
$\Phi_m =$	5.03E-04	(cm ² /min)

Res Type:	35.22
H1/a:	1.666667
H2/a:	3.333333
C1-0.01:	0.809485
C2-0.01:	1.21841
C1-0.04:	0.842059
C2-0.04:	1.290234
C1-0.12:	0.803154
C2-0.12:	1.287543
C1-0.36:	0.803154
C2-0.36:	1.287543

Tipo de Suelo	Limo
Grado de Permeabilidad	Baja
Kfs not a dec	0.00213
Kfs mm/día	30.663



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

Ensayo de permeabilidad Con el Permeámetro Guelph
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
Instituto de Geología y Geofísica
IGG - CIGEO / UNAN - Managua
Área de Hidrogeología



IGG-CIGEO
INSTITUTO DE
GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA
UNAN-MANAGUA

Proyecto	Bismarck Martínez						Localización	BM					
Fecha	17/ 06 / 2020						Operador	Juan y Karina					
Equipo							Tipo de suelo	Aneras (suelo resiente)					
Coordenadas	X	591206			Y	1343709			Z	52			
Obervaciones													
Tabla para la lectura de agua en el pozo				Carga #1:	5		Tabla para la lectura de agua en el pozo				Carga:	10	
Numero de Lectura	Tiemp [min]	Intervalo de tiemp [min]	Nivel del Agua en el Reservoirio [cm]	Cambio en el Nivel del Agua [cm]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/min]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/s]	Numero de Lectura	Tiemp [min]	Intervalo de tiemp [min]	Nivel del Agua en el Reservoirio [cm]	Cambio en el Nivel del Agua [cm]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/min]	Tasa de Cambio del Nivel del Agua [cm/s]
Inicio	01:34		0.00				Inicio	01:54		0.00			
1	1	1.00	5.20	5.200	5.200	0.087	1	1	1.00	10.20	10.20	10.200	0.170
2	2	1.00	7.20	2.000	2.000	0.033	2	2	1.00	13.00	2.80	2.800	0.047
3	3	1.00	9.50	2.300	2.300	0.038	3	3	1.00	16.00	3.00	3.000	0.050
4	4	1.00	11.50	2.000	2.000	0.033	4	4	1.00	19.00	3.00	3.000	0.050
5	5	1.00	13.50	2.000	2.000	0.033	5	5	1.00	21.50	2.50	2.500	0.042
6	6	1.00	15.20	1.700	1.700	0.028	6	6	1.00	24.00	2.50	2.500	0.042
7	7	1.00	17.20	2.000	2.000	0.033	7	7	1.00	27.00	3.00	3.000	0.050
8	8	1.00	19.00	1.800	1.800	0.030	8	8	1.00	30.00	3.00	3.000	0.050
9	9	1.00	21.00	2.000	2.000	0.033	9	9	1.00	32.20	2.20	2.200	0.037
10	10	1.00	22.50	1.500	1.500	0.025	10	10	1.00	35.00	2.80	2.800	0.047
11	11	1.00	24.50	2.000	2.000	0.033	11	11	1.00	38.00	3.00	3.000	0.050
12	12	1.00	26.20	1.700	1.700	0.028	12	12	1.00	40.00	2.00	2.000	0.033
13	13	1.00	28.00	1.800	1.800	0.030	13	13	1.00	43.00	3.00	3.000	0.050
14	14	1.00	30.00	2.000	2.000	0.033	14	14	1.00	45.50	2.50	2.500	0.042
15	15	1.00	31.50	1.500	1.500	0.025	15	15	1.00	48.00	2.50	2.500	0.042
16	16	1.00	33.50	2.000	2.000	0.033	16	16	1.00	51.00	3.00	3.000	0.050
				R1	Media	0.030					R2	Media	0.046
					Moda	0.033						Moda	0.050
					Mediana	0.033						Mediana	0.042

Método de las dos Cargas

Tipo de reservorio (introduzca "1" para combinado y "2" para reservorio interno): **1**

Introduzca la primera carga de agua ("H1" en cm): **5**

Introduzca la segunda carga de agua ("H2" en cm): **10**

Introduzca el radio del hueco ("a" en cm): **3**

Introduzca la categoría de la textura-estructura del suelo (uno de los números de abajo): **3**

1. Materiales compactos, sin estructura, arcillosos o limosos, como tapas o revestimientos sanitarios, sedimentos lacustres o marinos, etc.
2. Suelos con textura fina (arcillosos o limosos) y no estructurados; también puede incluir algunas arenas finas.
3. Suelos más estructurados desde arcillas hasta margas; también incluye arenas finas y medias no estructuradas. La categoría más frecuentemente aplicable para suelos agrícolas.
4. Arena gruesa y grava; también puede incluir algunos suelos altamente estructurados con grietas grandes y / o numerosas, macroporos, etc.

$$\alpha^* = 0.12 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$

Tasa de cambio del nivel de agua en estado estable ("R1" en cm/min): **0.0304**

Tasa de cambio del nivel de agua en estado estable ("R1" en cm/min): **0.0458**

$$Q_1 = 0.017855$$

$$Q_2 = 0.026904$$

$$c_1 = 0.803154$$

$$c_2 = 1.287543$$

$$G_1 = 0.004956$$

$$G_2 = 0.003972$$

$$G_3 = 0.055692$$

$$G_4 = 0.024148$$

Res Type: 35.22
 H1/a: 1.666667
 H2/a: 3.333333
 C1-0.01: 0.809485
 C2-0.01: 1.21841
 C1-0.04: 0.842059
 C2-0.04: 1.290234
 C1-0.12: 0.803154
 C2-0.12: 1.287543
 C1-0.36: 0.803154
 C2-0.36: 1.287543

$$K_{fs} = \begin{matrix} 1.84E-05 \text{ cm/sec} \\ 1.10E-03 \text{ cm/min} \\ 1.84E-07 \text{ m/sec} \\ 4.34E-04 \text{ inch/min} \\ 7.24E-06 \text{ inch/sec} \end{matrix}$$

$$\phi_m = 3.45E-04 \text{ (cm}^2\text{/min)}$$

Tipo de Suelo	Limo
Grado de Permeabilidad	Baja
Kfs not a dec	0.00110
Kfs mm/día	15.888

Anexo #2:
Datos para los análisis de las Pruebas de
Bombeo

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

		Data		0000114	
		Project: UNA FCA. STA. ROSA			
		No:	Page 1		
		Client: UNIVERSIDAD AGRARIA			
Location: SECTOR SUR DE LA		Pumping test: UNA SUR		Pumping well: UNA-	
Test performed Roger Ramirez					
at 18/11/2004					
Data observed at:			Depth to static WL: 28 [ft]		
Distance from pumping well: 0 [ft]					
	Time [min]	Depth to WL [ft]	Drawdown [ft]	Q (gpm)	
1	1	44.17	16.17	305	
2	2	39.33	11.33		
3	3	39.33	11.33		
4	4	39.33	11.33		
5	5	39.33	11.33		
6	6	39.50	11.50		
7	7	39.50	11.50		
8	8	39.50	11.50		
9	9	39.50	11.50		
10	10	39.50	11.50		
11	12	39.50	11.50		402
12	14	39.50	11.50		
13	16	39.50	11.50		
14	18	39.58	11.58		
15	20	39.58	11.58		
16	25	39.58	11.58		
17	30	39.58	11.58		
18	35	39.58	11.58		
19	40	39.58	11.58		
20	45	39.67	11.67		
21	50	39.67	11.67		
22	55	39.67	11.67		
23	60	39.67	11.67		
24	70	39.67	11.67		
25	80	39.67	11.67		
26	90	39.67	11.67		
27	100	39.67	11.67		
28	110	39.67	11.67		
29	120	39.67	11.67		
30	140	39.67	11.67		
31	160	39.67	11.67		
32	180	39.67	11.67		
33	181	42.92	14.92		
34	182	42.92	14.92		
35	183	42.92	14.92		

VICE GERENCIA
PERFORACION DE POZOS
ENCARGADO

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

Data		0000113		
Project: UNA FCA STA. ROSA		Page 2		
No:		Client: UNIVERSIDAD AGRARIA		
Location: SECTOR SUR DE LA		Pumping test: UNA SUR		Pumping well: UNA-
Test performed at: Roger Ramirez 18/1/2004		Depth to static WL: 28 [ft]		
Distance from pumping well: 0 [ft]				
	Time [min]	Depth to WL [ft]	Drawdown [ft]	Q (gpm)
36	184	42.92	14.92	
37	185	42.92	14.92	
38	186	42.92	14.92	
39	187	42.92	14.92	
40	188	42.92	14.92	
41	189	42.92	14.92	
42	190	42.92	14.92	
43	192	42.92	14.92	
44	194	42.92	14.92	
45	196	42.92	14.92	
46	198	42.92	14.92	
47	200	42.92	14.92	
48	205	42.92	14.92	
49	210	42.92	14.92	
50	215	42.92	14.92	
51	220	42.92	14.92	
52	225	42.92	14.92	
53	230	42.92	14.92	
54	235	42.92	14.92	
55	240	42.92	14.92	
56	250	42.92	14.92	
57	260	42.92	14.92	
58	270	42.92	14.92	
59	280	42.92	14.92	
60	290	42.92	14.92	
61	300	43.00	15.00	
62	320	43.00	15.00	
63	340	43.00	15.00	
64	360	43.00	15.00	
65	380	43.00	15.00	
66	400	43.00	15.00	
67	420	43.00	15.00	503
68	421	46.50	18.50	
69	422	46.75	18.75	
70	423	46.75	18.75	

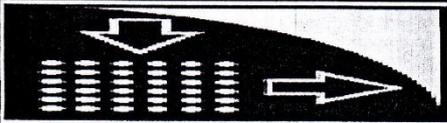
VICE GERENTE
RECONSTRUCCION DE POZOS
ENACAT

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

		Data		0000112	
		Project: UNA FCA. STA. ROSA			
		No:		Page 3	
		Client: UNIVERSIDAD AGRARIA			
Location: SECTOR SUR DE LA		Pumping test: UNA SUR		Pumping well: UNA-	
Test performed Roger Ramirez					
at 18/11/2004					
Data observed at:			Depth to static WL: 28 [ft]		
Distance from pumping well: 0 [ft]					
	Time [min]	Depth to WL [ft]	Drawdown [ft]	Q (gpm)	
71	424	46.75	18.75		
72	425	46.75	18.75		
73	426	46.75	18.75		
74	427	46.75	18.75		
75	428	46.75	18.75		
76	429	46.75	18.75		
77	430	46.75	18.75		
78	432	46.75	18.75		
79	434	46.92	18.92		
80	436	46.92	18.92		
81	438	46.92	18.92		
82	440	46.92	18.92		
83	445	46.92	18.92		
84	455	46.92	18.92		
85	460	46.92	18.92		
86	465	46.92	18.92		
87	470	46.92	18.92		
88	475	46.92	18.92		
89	480	46.92	18.92		
90	490	46.92	18.92		
91	500	46.92	18.92		
92	510	46.92	18.92		
93	520	46.92	18.92		
94	530	46.92	18.92		
95	540	46.92	18.92		
96	560	46.92	18.92		
97	580	46.92	18.92		
98	600	46.92	18.92		
99	620	46.92	18.92		
100	640	46.92	18.92		
101	670	46.92	18.92		
102	700	46.92	18.92		
103	730	46.92	18.92		
104	760	46.92	18.92		
105	790	46.92	18.92		

VICE GERENCIA
 PERFORACION DE POZOS


Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

		Data			
		Project: UNA FCA. STA. ROSA 0000111			
		No:	Page 4		
		Client: UNIVERSIDAD AGRARIA			
Location: SECTOR SUR DE LA		Pumping test: UNA SUR		Pumping well: UNA-	
Test performed Roger Ramirez					
at 18/11/2004					
Data observed at:		Depth to static WL: 28 [ft]			
Distance from pumping well: 0 [ft]					
	Time [min]	Depth to WL [ft]	Drawdown [ft]	Q (gpm)	
106	820	46.92	18.92		
107	850	46.92	18.92		
108	880	46.92	18.92		
109	910	46.92	18.92		
110	940	46.92	18.92		
111	970	46.92	18.92		
112	1000	46.92	18.92		
113	1030	46.92	18.92		
114	1060	46.92	18.92		
115	1090	46.92	18.92		
116	1120	46.92	18.92		
117	1150	46.92	18.92		
118	1210	46.92	18.92		
119	1240	46.92	18.92		
120	1270	46.92	18.92		
121	1300	46.92	18.92		
122	1330	46.92	18.92		
123	1360	46.92	18.92		
124	1390	46.92	18.92		
125	1420	46.92	18.92		
126	1440	46.92	18.92		

0000115

**EMPRESA NICARAGUENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS
(ENACAL)**

VICE-GERENCIA DE PERFORACIONES

AFORO, RECOMENDACIONES DE EXPLOTACION

POZO : UNA FINCA SANTA ROSA
LOCALIDAD : Universidad Nacional Agraria
N.E.A. : 28.0 PIES
PROFUNDIDAD : 300 PIES
ADEME : 10 PULGADAS

AFORO DE LARGA DURACION

CAUDAL : 460 GPM
DURACION : 24 HORAS
DESCENSO : 18.92 PIES
CAP. ESPECIFICA : 135 PIE²/MIN 24 600/215

AFORO ESCALONADO

ETAPA No.	CAUDAL (GPM)	DESCENSO (PIE)
1	305	11.67
2	402	15.00
3	503	18.82

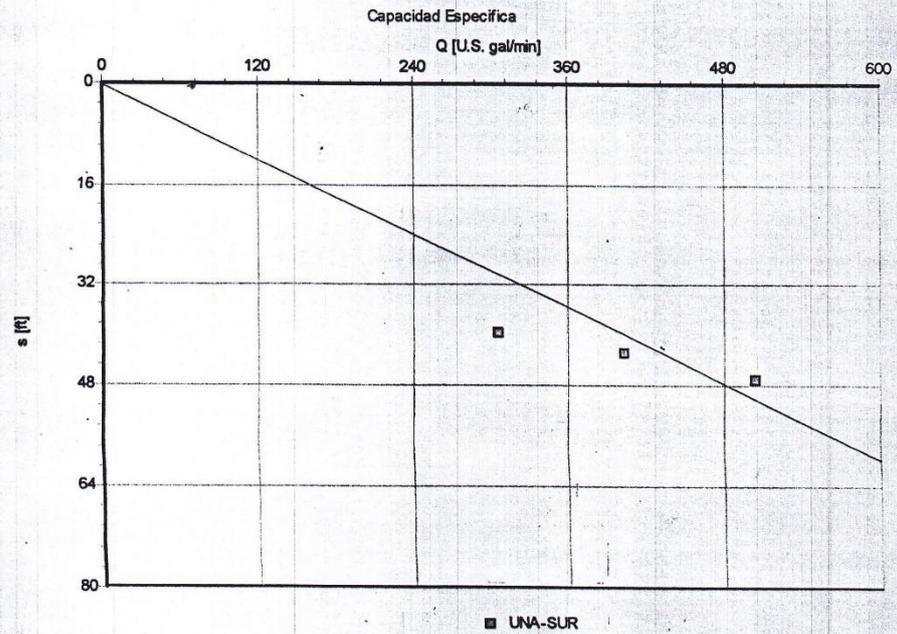
RECOMENDACIONES

CAUDAL DE EXPLOTACION : 600 GPM
NIVEL DE BOMBEO : 130 PIES
COLUMNA DE BOMBA : 140 PIES

PERFORACIONES
ENACAL

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

			Pumping test analysis		
			No: 0000110		
			Project: UNA FCA. STA. ROSA		
Client: UNIVERSIDAD AGRARIA					
Location: SECTOR SUR DE LA		Pumping test: UNA SUR		Pumping well: UNA-SUR	
Prueba realizada por: Roger Ramirez			Evaluado por: Guillermo Pichardo		
Fecha de 18/11/2004			Fecha de 01/12/2004		
Analysis method: Specific Capacity			Aquifer thickness: 240		
			Discharge rate: 461.41667 [U.S. gal/min]		



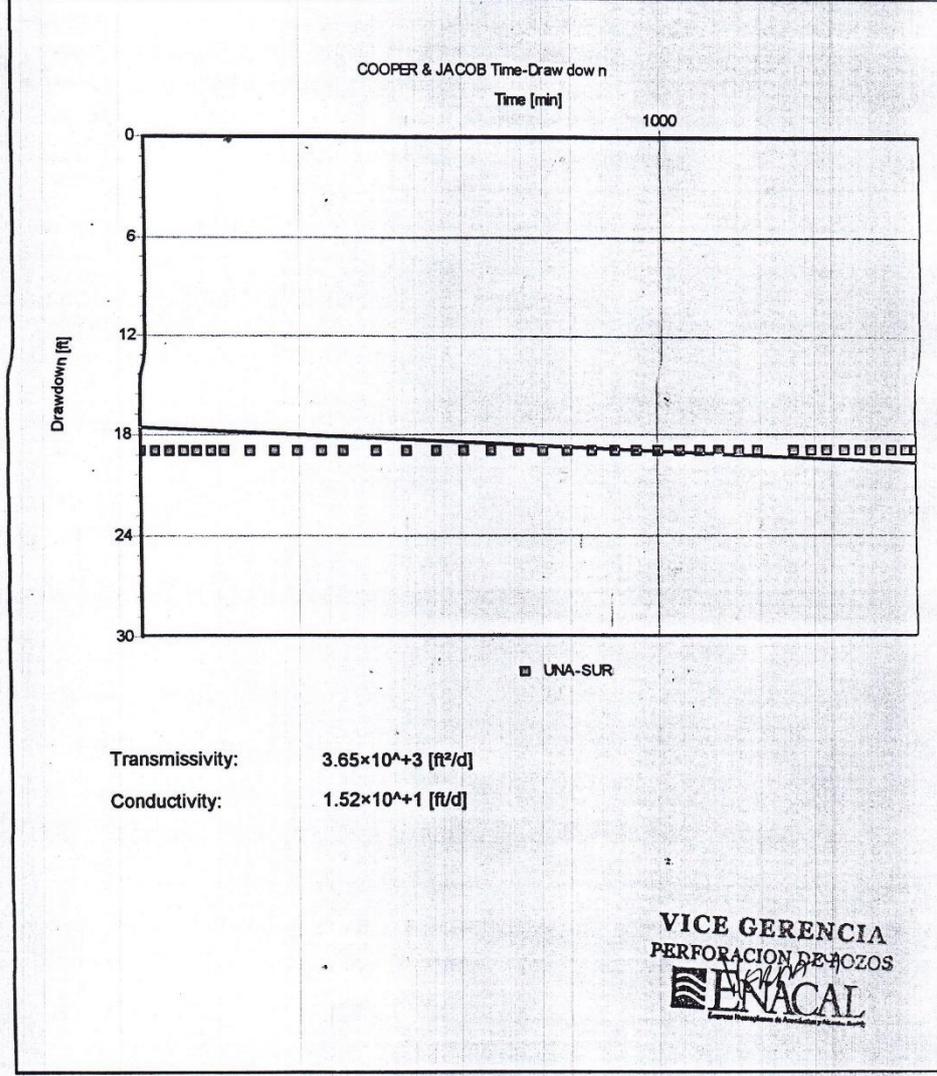
Spec. Capacity.: $1.35 \times 10^{-4} \text{ [ft}^2/\text{min]}$

De acuerdo a la gráfica de Capacidad Especifica, se recomienda un caudal de 600 gpm

VICERRENCIA
 DE REGULACION DE POZOS
ENACAL
Agencia Nacional de Regulación y Control de Aguas

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

		Pumping test analysis		0000109
		No:		
		Project: UNA FCA. STA. ROSA		
Client: UNIVERSIDAD AGRARIA				
Location: SECTOR SUR DE LA	Pumping test: UNA SUR	Pumping well: UNA-SUR		
Prueba realizada por: Roger Ramirez		Evaluado por:		
Fecha de 18/11/2004	Fecha de 01/12/2004			
Analysis method: COOPER & JACOB Time-Drawdown	Aquifer thickness: 240	Discharge rate: 461.41667 [U.S. gal/min]		



Anexo #3:

Datos para los análisis Químicos

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



Gobierno de Reconciliación
y Unidad Nacional
El Pueblo, Presidente!

40
2019

Aquí nos ilumina,
un Sol que no declina
El Sol que alumbró
las nuevas victorias
RUBÉN DARÍO

MEMORANDUM
DCCA/435/12/19

A : Ing. Amilcar J. Rojas Valle.
Jefe del Dpto. de Hidrología.

De : Ing. Martín Brenes Solorzano.
Director Ambiental.

Ref. : REMISIÓN DE INFORME DE RESULTADOS.

Fecha : 18 de diciembre del 2019.



Adjunto al presente remito informe de evaluación con sus respectivos análisis e interpretación de los resultados de calidad del agua de los pozos perforados San Cristóbal No. 4 (UNA) y Granja Acuicultura, de los resultados se generó las siguientes conclusiones.

Los **PP San Cristóbal No. 4 (UNA) y Granja Acuicultura**, de acuerdo a los parámetros fisicoquímico analizados, con respecto a Potasio (24.15 y 23.02 mg/L), no cumplen con la Norma CAPRE (10 mg/L), el Potasio es un parámetro de carácter estético en el sentido del paladar, no percible en el gusto, no perjudicial para la salud.

Sobre Metales Pesados, con respecto a Arsénico, Plomo, Manganeso, cumplen con las Normas CAPRE (10 µg/L, 10 µg/L, 500 µg/L).

Sin más sobre el particular, le saludo.

Atentamente.

CC: Gerencia Ambiental.
Archivo.



CRISTIANA, SOCIALISTA, SOLIDARIA!
EMPRESA NICARAGÜENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS SANITARIOS
ENACAL - GERENCIA AMBIENTAL
Dirección: Km. 5 carretera sur - Teléfonos: 2253800 Ext. 2085
Email: martinbrenes@enacal.com.ni - www.enacal.com.ni

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



Gobierno de Reconciliación
y Unidad Nacional
El Pueblo, Presidente!

49
2019

Aquí nos ilumina,
un Sol que no declina
El Sol que alumbró
las nuevas victorias
BUEN DÍA

INFORME

1. OBJETIVO :

Evaluar la Calidad del Agua de los PP San Cristóbal No. 4(UNA) y PP Granja Acuicultura, para conocer la calidad y potabilidad del agua.

2. FECHA DEL MONITOREO: 16 de diciembre del 2019
HORA: 10:01 am - 10:30 am

3. REALIZÓ EL MUESTREO:

Lic. Silvia Sandoval R. Supervisor Calidad del Agua Managua.

4. TRABAJO REALIZADO:

Toma de muestras para la realización de análisis fisicoquímico Completo, Metales Pesados (Arsénico, Plomo, Manganese). Lectura de parámetros de Campo (pH, Temperatura °C, Conductividad Eléctrica µS/cm).

5. GENERALIDADES.

Atendiendo solicitud del Ing. Amílcar J. Rojas V. (Jefe del Dpto. de Hidrogeología), personal de Calidad del Agua se presentó a los pozos en mención a captar las muestras para los debidos análisis.

6. RESULTADOS

PP San Cristóbal No. 4 (UNA) - Managua.

En resultado fisicoquímico, reflejó Potasio 24.15 mg/L, arriba de la Norma CAPRE (10 mg/L), el resto de parámetros analizados cumplen con las Normas CAPRE.

En resultados de Metales Pesados reflejó Arsénico con 4.87 µg/L, Plomo ND (No detectado), Manganese 0.184 mg/L, equivalente a 184 µg/L.

PP Granja de Acuicultura - Managua.

En resultado fisicoquímico, reflejó Potasio 23.02 mg/L, arriba de la Norma CAPRE (10 mg/L), el resto de parámetros analizados cumplen con las Normas CAPRE.

En resultados de Metales Pesados reflejó Arsénico con 3.17 µg/L, Plomo ND (No detectado), Manganese 0.243 mg/L, equivalente a 243 µg/L.

7. CONCLUSIONES

Los PP San Cristóbal No. 4 (UNA) y Granja Acuicultura, de acuerdo a los parámetros fisicoquímico analizados, con respecto a Potasio (24.15 y 23.02 mg/L), no cumplen con la Norma CAPRE (10 mg/L), el Potasio es un parámetro de carácter estético en el sentido del paladar, no perceptible en el gusto, no perjudicial para la salud.

FE,
FAMILIA
Y COMUNIDAD!

CRISTIANA, SOCIALISTA, SOLIDARIA
EMPRESA NICARAGÜENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS SANITARIOS
ENACAL - GERENCIA AMBIENTAL
Dirección: Km. 5 carretera sur - Telefonos: 2253800 Ext. 2085
Email: martinbrenes@enacal.com.ni - www.enacal.com.ni



Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



Gobierno de Reconciliación
y Unidad Nacional
El Pueblo, Presidente!

40
2019

Aquí nos ilumina,
un Sol que no declina
El Sol que alumbra
las nuevas victorias
RUBÉN DARÍO

Sobre Metales Pesados, con respecto a Arsénico, Plomo, Manganeso, cumplen con las Normas CAPRE (10 µg/L, 10 µg/L, 500 µg/L).

Se adjunta resultados fisicoquímico, Metales Pesados, emitidos por el Laboratorio Central ENACAL.

Elaborado por:

Lic. Haydée Selva V.
Analista Estadístico.

Revisado por:

Ing. Martín Brenes Solórzano
Jefe Dpto. Calidad del Agua.



CRISTIANA, SOCIALISTA, SOLIDARIA!
EMPRESA NICARAGÜENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS SANITARIOS
ENACAL - GERENCIA AMBIENTAL
Dirección: Km. 5 carretera sur - Teléfonos: 2253800 Ext. 2085
Email: martinbrenes@enacal.com.ni - www.enacal.com.ni

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



EMPRESA NICARAGÜENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS SANITARIOS

**LABORATORIO CENTRAL
REPORTE ANALITICO**

I. Datos generales

Número de Informe: 2019-2134

Unidad Organizativa Solicitante

Calidad del Agua

Informe dirigido a: Ing. Martin Brenes

Procedencia de la muestra

Departamento: Managua

Municipio: Managua

Localidad: Managua

II. Información de la muestra

Código Laboratorio 13752

Cadena custodia 0616

Descripción de la muestra y Punto de captación

PP San Cristobal No. 4 (UNA)

No especificado

Fecha de captación: 16/12/2019 10:00:00 a.m.

Fecha de ingreso al Lab: 16/12/2019 01:24:00 p.m.

Fecha de emisión de informe: 18/12/2019

Muestra captada por: Sílvia Sandoval

RESULTADOS DE ANALISIS FISICO QUIMICO

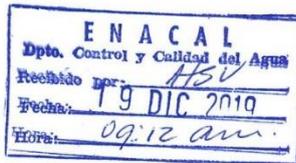
PARÁMETRO	Unidad	RESULTADO	Método	Límite de Detección
Apariencia		CLARA	inspección visual	no aplicable
Color verdadero	UC	0.09	colorimétrico Pt Co	3.226 UC
Turbidez	NTU	0.30	SM 2130 B.	0.404 ntu
Sólidos disueltos	mg/L	564.16	SM 2540 c	no aplicable
Temperatura	°C	25.5	SM 2550 B.	no aplicable
pH	adim.	8.14	SM 4500-H B.	no aplicable
Conductividad elect.	µS/cm	946.00	SM 2510 B.	2.547 µS/cm
Alcalinidad total (CaCO3)	mg/L	476.98	SM 2320 B.	5.202 mg/L
Dureza total (CaCO3)	mg/L	267.03	SM 2340 C.	no determinado
Índice de saturación	Adim.	1.09	SM 2330 B.	no aplicable
Sodio (Na)	mg/L	133.50	SM 3500-Na B	0.020 mg/l
Calcio (Ca)	mg/L	52.78	SM 3500-Ca B.	no determinado
Magnesio (Mg)	mg/L	32.86	SM 3500-Mg B.	no determinado
Potasio (K)	mg/L	24.15 *	SM 3500-K B.	0.020 mg/l
Hierro total (Fe 2+)	mg/L	0.12	SM 3500 Fe- B	0.075 mg/L
Bicarbonatos (HCO3)	mg/L	581.56	SM 2320 B.	no determinado
Carbonatos (CO3)	mg/L	0.00	SM 2320 B.	no determinado
Hidroxilo (OH)	mg/L	0.0	SM 2320 B.	no determinado
Cloruros (Cl)	mg/L	34.47	SM 4500-Cl F.	2.917 mg/L
Sulfatos (SO4)	mg/L	87.22	SM 4500-SO4 B.	6.576 mg/L
Nitratos (NO3)	mg/L	0.40	SM 4500-NO3-C	0.378 mg/L
Nitritos (NO2)	mg/L	ND	SM 4500-NO2-C.	0.016 mg/L
Fluor (F)	mg/L	0.33	SM 4500-F C.	-0.150 mg/L
Boro (B)	mg/L		SM 4500-B B.	0.056 mg/L
Silíce (SiO2)	mg/L		SM 4500-SiO2 C.	0.041 mg/L
Amonio	mg/L		4500-NH3 F.	0.0003 mg/L
Sulfuro	mg/L			0.040 mg/L

% balance iónico: 5.6

OBSERVACIONES: SM Estándar Método para la examinación de agua y agua residual. Edición 17 y 21 APHA AWWA WEF

DATOS DE CAMPO: PH= 7.30, Temp= 33.3, Cond. Elect= 1075.0

Lic. Narciso Romero Pérez
Analista Laboratorio Físico Químico



Ing. Evelyn Rodríguez Ordozco
Analista Lab/ Cromatografía de Gases

Km 5 carretera sur 35 avenida S.O., Managua, Nicaragua
Teléfono 22538000 ext 2160-2162 Módulos Nuevos
Página 1 de 1

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



**LABORATORIO CENTRAL
REPORTE ANALITICO**

I. Datos generales

Número de Informe: 2019-2134

Unidad Organizativa Solicitante

Calidad del Agua

Informe dirigido a: Ing. Martín Brenes

Procedencia de la muestra

Departamento: Managua

Municipio: Managua

Localidad: Managua

II. Información de la muestra

Código Laboratorio 2019-2134

Cadena custodia 0616

Descripción de la muestra y Punto de captación

PP San Cristobal No. 4 (UNA) (13752)

PP

Fecha de captación: 16/12/2019

Fecha de ingreso al Lab: 16/12/2019

Fecha de emisión de informe: 17/12/2019

Muestra captada por: Silvia Sandoval

RESULTADOS DE ANALISIS DE ABSORCION ATOMICA

PARÁMETRO	Unidad	RESULTADO	Incertidumbre	Método	Límite de Detección
Arsénico (As)	µg/L	4.87		SM 3113 B, 3030 E	0.289
Plomo (Pb)	µg/L	ND		SM 3113 B, 3030 E	0.176
Cromo (Cr)	µg/L			SM 3113 B, 3030 E	
Aluminio (Al)	µg/L			SM 3113 B, 3030 E	
Cobre (Cu)	mg/L			SM 3111 B, 3030 E	
Cadmio (Cd)	µg/L			SM 3113 B, 3030 E	
Manganeso (Mn)	mg/L	0.184		SM 3111 B, 3030 E	0.059
Mercurio (Hg)	µg/L			SM 3114 C, 3030 E	
Zinc (Zn)	mg/L			SM 3111 B, 3030 E	
Hierro total (Fe T.)	mg/L			SM 3113 B, 3030 E	
Níquel (Ni)	µg/L			SM 3113 B, 3030 E	

ND: No Detectado

Datos de campo

Temp_campo: 33.3

pH_campo: 7.3

Cond. Elect. campo: 1075

OBSERVACIONES:

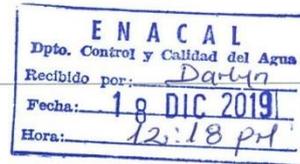
El Método utilizado es SM-3113-B (Absorción Atómica con Homo de Grafito) y SM-3111-B (Absorción Atómica con Método Directo de Llama Aire-Acetileno) de Standard Methods, 21th Edición. Con modificador de matriz de Pd (NO3)2 40% para As y modificador de matriz de Mg (NO3)2 50% para Pb. Rango de Trabajo de (5.0 a 20) µg/L As, (2.5 a 10) µg/L Pb, (0.5 a 2.0) mg/L Mn.

Ing. Cruz Elena Loaisiga A
Analista Laboratorio Absorción Atómica

Ing. Evelyn Rodríguez Orozco
Analista Laboratorio Cromatografía de Gases

Km 5 carretera sur 35 avenida S.O., Managua, Nicaragua
Teléfono 22538000 ext 2160 / 2162

Página 1 de 1



Anexo #4:

Propuesta de Ubicación del Pozo de Extracción

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.

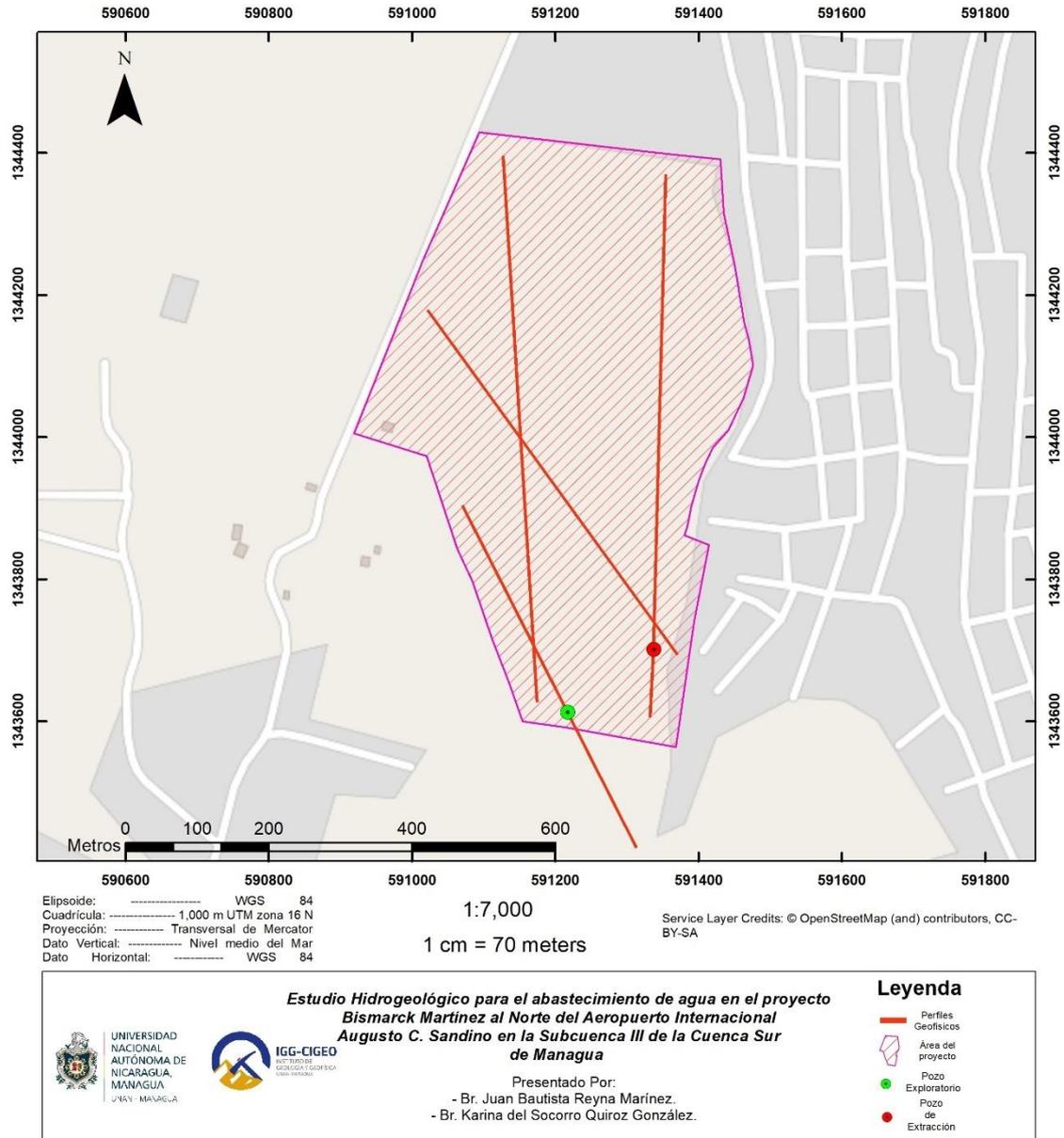


Ilustración 37. Ubicación recomendada del pozo de extracción. Fuente: Elaboración Propia

Anexo #5:
**Propuesta de Ubicación de las Rejillas en el
pozo de Extracción**

Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



Estudio Hidrogeológico para el abastecimiento de agua en el proyecto Bismarck Martínez al Norte del Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino en la Subcuenca III de la Cuenca Sur de Managua.



Presentado por:
-Br. Juan Bautista Reyna Martínez
-Br. Karina Quiroz González

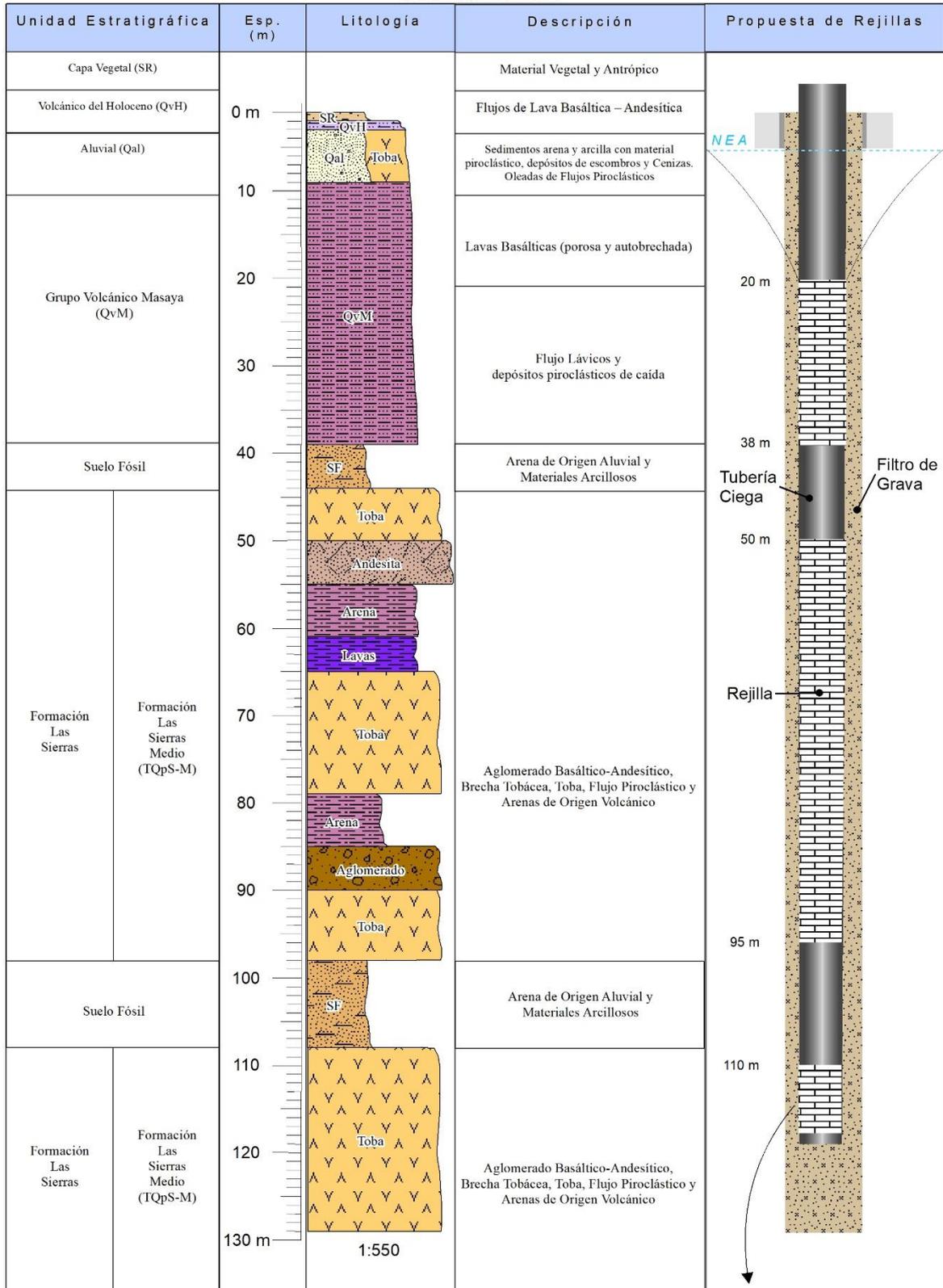


Ilustración 38. Propuesta de Rejillas. Fuente: Elaboración propia