

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GEOHIDROLOGÍA Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL CONO ALUVIAL FORMADO POR EL RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN, MACUTO, ESTADO VARGAS.

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela Por los Brs.
Araujo Barraza, Johanna Isabel
Parada Guerra, Edgar Eduardo
para optar al título de Ingeniero Hidrometeorologista.

Caracas, noviembre de 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GEOHIDROLOGÍA Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL CONO ALUVIAL FORMADO POR EL RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN, MACUTO, ESTADO VARGAS.

Tutor académico: Prof. David Pérez Hernández

Tutor industrial: Ing. Roraima Alfonzo

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela Por los Brs.
Araujo Barraza, Johanna Isabel
Parada Guerra, Edgar Eduardo
para optar al título de Ingeniero Hidrometeorologista.

Caracas, noviembre de 2007

DEDICATORIA

*A Dios, por estar siempre a mi lado y guiarme.
A mi madre y mejor amiga,
cuyo apoyo me ha permitido alcanzar esta meta.*

Johanna Araujo B.

*A...
Mery y Blas, mis Padres
Blanca y Paulino, mis Padres Adoptivos
Yuli y Yenny, mis Hermanas
Armenia, mi Tía
Lino, mi mejor amigo (Hermano)
Katy y Lulu, mis hermanitas*

Edgar Parada G.

AGRADECIMIENTOS

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela.

Al Profesor David Pérez H., mi tutor en este trabajo, cuyos conocimientos, paciencia, dedicación y orientación a la excelencia, contribuyeron a dar lo mejor de mi persona en la realización del Trabajo Especial de Grado y en su culminación en el tiempo previsto.

A los Profesores Marco Polo Rivero y Abraham Salcedo, con quienes compartí durante estos años de estudio en el Departamento de Hidrometeorología como una gran familia, y quienes además de su aporte en mi formación académica, me inculcaron valores que han favorecido mi crecimiento personal.

A la Profesora Rosario y al Sr. Alejandro de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas, quienes de manera desinteresada, realizaron los análisis físico-químicos necesarios en la elaboración del trabajo.

Al Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF).

A la Lic. Jenny Cárdenas de HIDROCAPITAL, por las facilidades brindadas en los momentos en que fue requerido el apoyo de dicho organismo.

Al Sr. Daniel Castro, por la valiosa colaboración prestada en la ubicación de los pozos.

A los Profesores del Departamento, muy especialmente a Valdemar Andrade, Porfirio Arellano, Ventura y Leoncio Pérez, por contar con su apoyo y amistad.

A Joaquín Cano, quien en todo momento me apoyó en mis estudios en el Departamento de Hidrometeorología.

Finalmente, mi gratitud a todos los demás integrantes del citado Departamento (estudiantes, personal administrativo y obrero), con quienes compartí durante estos años.

Johanna Araujo

A Dios por iluminar el camino por donde siempre he caminado.

A mis Padres, Mery y Blas por confiar en mi, ya que sin ellos todo esto no habría sido posible.

A mi segunda Mamá Blanca, siempre estarás en mi corazón, yo se que allá en el cielo esto es un motivo de felicidad para ti... Te Quiero Mucho.

A mis hermanas Yuli y Yenny por haber siempre creído en mí.

A mi mejor amigo Lino por ser el hermano que nunca había tenido.

A mis Tíos, por estar presentes a lo largo de toda mi vida.

A la Universidad Central de Venezuela por ser una casa de estudio invaluable y donde sólo se viven experiencias únicas, ucevista hoy mañana y siempre.

Al Tutor Profesor David Pérez Hernández, gracias por ser el guía de todo este trabajo.

A la Tutora Industrial Ing. Roraima Alfonso por ser la persona quien me motivo al camino de la Hidrología Subterránea.

A todos lo Profesores del Dpto. de Ing. Hidrometeorológica, Abraham, Pérez Machado, Marco Polo, Ventura, Valdemar, María Teresa.

A todas la personas que pusieron su granito de arena en la realización de este trabajo, realmente muchísimas gracias.

Edgar Eduardo Parada Guerra

Caracas, 19 de noviembre de 2007

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Civil, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres Johanna Araujo y Edgar Parada, titulado:

**“GEOHIDROLOGÍA Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL
FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL CONO ALUVIAL FORMADO POR EL
RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN, MACUTO, ESTADO VARGAS”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Hidrometeorologista, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. David Pérez H.

Jurado

Prof. Marco Polo Rivero

Jurado

Prof. Leoncio Pérez M.

Jurado

Araujo B., Johanna I.

Parada G., Edgar E.

**GEOHIDROLOGÍA Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO
DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL CONO ALUVIAL
FORMADO POR EL RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN, MACUTO,
ESTADO VARGAS**

**Tutor académico: Prof. David Pérez Hernández. Tutor industrial: Ing.
Roraima Alfonzo. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de
Ingeniería Hidrometeorológica. Año 2007, 105 p.**

Resumen. En el presente estudio se muestran los resultados obtenidos al evaluar las condiciones geohidrológicas y la caracterización físico-química de las aguas subterráneas en el cono aluvial de Macuto con fines de aprovechamiento.

La zona de estudio corresponde al cono aluvial de Macuto, tiene un área aproximada de 0,23 km² y se ubica geográficamente entre las coordenadas U.T.M. norte 1.173.410-1.173.620 y este 729.815-730.580 y con ápice en las coordenadas 1.172.080N-730.420E. Desde el punto de vista geo-político forma parte de la parroquia Macuto, municipio La Guaira del Estado Vargas. El cono presenta una forma triangular con ensanchamiento notable a partir de la zona de transición de la montaña hacia la costa, tiene una extensión longitudinal de 1873 m de los cuales 725 m corresponden a la zona de transición y 1148 m a la parte más desarrollada del mismo. Presenta un ancho máximo de 623 m y debido al evento catastrófico ocurrido en el estado Vargas en diciembre de 1999, la línea de costa se expandió aproximadamente 300 m.

En el cono de Macuto, dos mecanismos han ejercido papel significativo en su origen: acumulación de materiales suministrados mayormente por flujos controlados por efecto de la gravedad y formados por flujos torrenciales. Como resultado de los procesos de sedimentación en el tiempo, la unidad litológica que caracteriza el cono de Macuto, corresponde a aluviones recientes (Qal), la cual descansa discordantemente sobre las rocas de la Asociación Metamórfica La Costa, específicamente es sustentado por el Esquisto de Tacagua. Una pequeña porción al este de la zona de transición del cono, se encuentra en contacto con la unidad Serpentina (sp), perteneciente igualmente a la referida asociación. En cuanto al ápice del cono, éste se encuentra en contacto con la unidad litodémica Augengneis de Peña Mora de la Asociación Metamórfica Ávila.

Las características granulométricas de los materiales superficiales del cono, evidencian como sería de esperarse, que las gravas gruesas predominan hacia el ápice del cono, las partículas de tamaños intermedios predominan en la zona media del abanico y los sedimentos de granulometría más finas tienden a acumularse en la parte distal del abanico inmediato a la zona costera. Estos sedimentos recientes están representados básicamente por materiales gruesos de carácter gravo-arenoso, resultado éste obtenido mediante el análisis granulométrico de una muestra captada en fosa del depósito de sedimentos del vaso sedimentado de la presa Macuto.

En la zona bajo estudio se identificaron diez (10) pozos, el agua extraída de los mismos se emplea con fines de consumo doméstico. Anualmente el volumen de agua extraída de las reservas del acuífero por parte de estos pozos es de 478.400 m³. En este sentido, se determinó que el almacenamiento de agua en la zona freática es igual a 1.656.000 m³, valor éste calculado a partir del área del cono, espesor saturado y porosidad determinada en el laboratorio para la muestra captada en el depósito de sedimentos almacenados en el vaso del embalse Macuto, bajo la premisa de que ésta mantiene un valor similar al que puede encontrarse en el cuerpo principal del cono.

El volumen de agua necesaria para saturar el volumen total de sedimentos acumulados en el cono de Macuto (8,21x10⁵ m³) es igual 197.040 m³, mientras que el volumen de agua que puede almacenarse en la zona vadosa, es de 303.600 m³.

La dirección del flujo subterráneo en la parte inferior del cono es al Noreste y Noroeste del Río Macuto, formando una superficie radial divergente, donde se determina que el río es la principal fuente de recarga del acuífero dentro de la zona del abanico aluvial, mientras que el río en la zona angosta y acañada del fondo del valle, actúa como receptor de las aguas subterráneas almacenadas en las rocas metamórficas que forman las laderas del valle.

La permeabilidad que se considera más representativa para el material en el acuífero es de 22 m/día, debido a que este valor se obtuvo mediante métodos de laboratorio, los cuales son mucho más precisos que los métodos de campo, y, además, los valores determinados para el referido parámetro mediante los ensayos de recuperación, son afectados por las condiciones específicas, bajo las cuales se ejecutaron las pruebas.

De acuerdo al análisis pluviométrico de la zona, la época en que el acuífero logra almacenar agua, corresponde al período comprendido entre los meses de Mayo y Noviembre.

El análisis físico-químico a muestras de agua recolectadas en algunos pozos de la zona, determina que la mayor concentración de sólidos disueltos se encuentra en la zona costera, y disminuyen hacia las áreas más alejadas de la referida, este comportamiento se presenta específicamente para los iones Mg⁺², Fe²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻ y Cl⁻. Las muestras analizadas se clasifican como aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, a excepción de la muestra recolectada en un pozo cercano a la costa, que se clasifica como aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas. Este pozo por su profundidad de perforación, se encuentra cercano a la interfase agua dulce-salada, verificándose intrusión salina. La calidad de agua es apta para consumo humano, riego y algunas actividades industriales, a excepción del agua extraída del último pozo referido.

Por otra parte, se observa que algunas características químicas evaluadas para la muestra de agua superficial recolectada en el río Macuto a nivel de la presa, son similares a las obtenidas para las muestras de agua recolectadas de los pozos. Lo anterior refuerza el criterio de que las aguas superficiales del río Macuto recargan al acuífero bajo estudio.

Se recomienda construir pozos para la extracción de agua subterránea en los aluviones de relleno situados hacia la parte acañonada del valle donde se cuenta con recarga efectiva proveniente de las rocas metamórficas que conforman las laderas del valle y donde además el riesgo de intrusión salina es menor.

ÍNDICE GENERAL

	Página
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. CONTRIBUCIÓN DEL ESTUDIO.....	4
4. UBICACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	5
5. METODOLOGÍA.....	6
5.1 Etapa Preliminar.....	6
5.2 Etapa de Campo.....	6
5.2.1 Elaboración del inventario de pozos ubicados en la zona de estudio.....	6
5.2.2 Medición de niveles estáticos.....	7
5.2.3 Ejecución de prueba de bombeo.....	8
5.2.4 Ejecución de pruebas de recuperación.....	9
5.2.5 Recolección de muestras de agua para su análisis físico-químico y recopilación de análisis previos.....	9
5.2.6 Recolección de muestras de sedimentos en el vaso sedimentado de la presa Macuto.....	11
5.3 Etapa de Laboratorio.....	11
5.3.1 Tamizado de las muestras de sedimentos.....	11
5.3.2 Cálculo experimental de la porosidad.....	12
5.3.3 Cálculo experimental de la permeabilidad.....	13
5.4 Etapa de Oficina.....	13
6. GEOLOGÍA LOCAL.....	14
7. DESCRIPCIÓN DEL CONO ALUVIAL DE MACUTO.....	17
8. INVENTARIO DE LOS POZOS.....	22
8.1 Ubicación y características principales de los pozos.....	23
8.2 Utilización del agua subterránea.....	30

9. FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	32
9.1 Líneas isopiezas (Potenciométricas).....	32
9.2 Mapa isopiécico (potenciométrico).....	35
9.3 Interpretación de la superficie potenciométrica.....	35
9.3.1 Zona oeste del río Macuto.....	36
9.3.2 Zona este del río Macuto.....	37
10. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL ACUÍFERO.....	38
10.1 Determinación de los parámetros mediante métodos de campo.....	40
10.1.1 Primera prueba de recuperación.....	40
10.1.1.1 Cálculo del valor de la Transmisividad (T)	
mediante los datos de abatimientos residuales.....	41
10.1.1.2 Cálculo del coeficiente de permeabilidad (K).....	43
10.1.2 Segunda prueba de recuperación.....	44
10.1.2.1 Cálculo del valor de la Transmisividad (T)	
mediante los datos de abatimientos residuales.....	45
10.1.2.2 Cálculo del coeficiente de permeabilidad (K).....	46
10.2 Determinación de la permeabilidad para el material recolectado	
en el vaso del embalse Macuto mediante método de laboratorio.....	46
10.3 Análisis de las permeabilidades obtenidas.....	50
11. BALANCE HÍDRICO.....	51
11.1 Parte baja de la cuenca del río San José de Galipán.....	51
11.2 Parte alta de la cuenca del río San José de Galipán.....	52
12. ALMACENAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL	
CONO DE MACUTO.....	55
12.1 Determinación de la porosidad.....	56
12.2 Zonas de humedad.....	59
12.3 Volumen de agua almacenado en el acuífero.....	60
13. CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA DE LAS AGUAS.....	63
13.1 Características físicas y químicas generales del agua subterránea.....	64
13.1.1 Características químicas.....	66
13.1.2 Características físicas.....	74

13.2 Clasificación de las aguas.....	75
13.3 Calidad de las aguas para uso doméstico.....	79
13.4 Calidad de las aguas para riego.....	81
13.4.1 Razón de absorción de sodio (RAS).....	81
13.4.2 Conductividad eléctrica.....	83
13.5 Calidad de las aguas para uso industrial.....	85
14. Programa propuesto de explotación y aprovechamiento de las aguas subterráneas en el cono aluvial de Macuto.....	87
14.1 Contaminación de las aguas subterráneas.....	87
14.2 Intrusión salina.....	88
14.3 Radio de influencia para la ubicación de nuevas obras de captación....	94
15. CONCLUSIONES.....	96
16. RECOMENDACIONES.....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	101
GLOSARIO.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación relativa del área de estudio.....	5
Figura 2. Cono aluvial de Macuto.....	5
Figura 3. Medición con la sonda eléctrica de los niveles estáticos.....	8
Figura 4. Sitio de captación de la muestra de agua superficial.....	9
Figura 5. Recolección de la muestra de agua.....	10
Figura 6. Sitio de captación de la muestra en el depósito excavado en el vaso del embalse Macuto.....	11
Figura 7. Procedimiento de cuarteo de la muestra de campo.....	12
Figura 8. Permeámetro utilizado en el laboratorio del IMF para medir la conductividad.....	13
Figura 9. Esquema de la geología del macizo del Ávila.....	15
Figura 10. Unidades litológicas presentes en la zona de estudio.....	16
Figura 11. Granulometría del material aluvial depositado en el vaso del embalse Macuto.....	19
Figura 12. Canal del río Macuto revestido por gaviones. Vista aguas debajo de la presa Macuto.....	21
Figura 13. Ubicación de los pozos en el cono de Macuto.....	22
Figura 14. Mapa piezométrico en el sector del Cono Aluvial de Macuto.....	34
Figura 15. Curvas de abatimiento y recuperación de una prueba de bombeo a caudal constante.....	39
Figura 16. Variación de los Niveles Dinámicos en la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ07, Macuto Edo. Vargas.....	41
Figura 17. Representación en escala semilogarítmica de la relación Descenso residual vs. t/t' en la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ07.....	42
Figura 18. Variación de los Niveles Dinámicos en la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ06, Macuto Edo. Vargas.....	44

Figura 19. Representación en escala semilogarítmica de la relación Descenso residual vs. t/t' en la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ06.....	45
Figura 20. Estructura de un permeámetro de carga variable.....	47
Figura 21. Variación relativa de las alturas manométricas en función del tiempo. Ensayo de permeabilidad para el material recolectado en el vaso del embalse Macuto.....	49
Figura 22. Variación de la precipitación media mensual y evapotranspiración potencial, Estación Macuto Edo. Vargas.....	52
Figura 23. Variación de la precipitación media mensual y evapotranspiración potencial, Estación Caracas-Humboldt.....	53
Figura 24. Croquis ilustrativo de un volumen de material acuífero, mostrando la fase sólida y el espacio vacío.....	57
Figura 25. Distribución del agua debajo del subsuelo. Clasificación propuesta por Davis (1971).....	59
Figura 26. Diagrama de Stabler para la muestra M-PZ01.....	70
Figura 27. Diagrama de Stabler para la muestra M-PZ07.....	71
Figura 28. Diagrama de Stabler para la muestra M-PZ03. Captada el día 05/10/2007.....	71
Figura 29. Diagrama de Stabler para la muestra M-PZ03. Captada en 01/2007.....	72
Figura 30. Diagrama de Stabler para la muestra de agua superficial.....	72
Figura 31. Diagrama de Piper.....	76
Figura 32. Diagrama de Piper para las muestras de agua analizadas.....	78
Figura 33. Mapa del cono de Macuto mostrando las secciones transversales A-A', B-B'.....	89
Figura 34. Intrusión salina según la teoría de Ghyben-Herzberg.....	90
Figura 35. Representación de la interfase agua dulce-salada para el corte A-A' de la figura 33.....	92
Figura 36. Representación de la interfase agua dulce-salada para el corte B-B' de la figura 33.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Valores obtenidos del tamizado de las muestras de sedimentos del vaso del embalse Macuto.....	19
Tabla 2. Volúmenes de agua subterránea extraída anualmente de los pozos ubicados en el cono de Macuto.....	30
Tabla 3. Niveles Piezométricos para el mes de Septiembre de 2007. Cono de Macuto Edo. Vargas.....	33
Tabla 4. Datos obtenidos de la prueba de recuperación en el pozo PZ07 realizada el 27/09/07.....	40
Tabla 5. Datos obtenidos de la prueba de recuperación en el pozo PZ06 realizada el 21/10/07.....	44
Tabla 6. Resultados obtenidos en los tres ensayos con el permeámetro de carga variable.....	49
Tabla 7. Balance hídrico parte baja de la cuenca del Río San José de Galipán (Estación Macuto).....	51
Tabla 8. Balance hídrico parte alta de la cuenca del Río San José de Galipán (Estación Caracas- Humboldt).....	53
Tabla 9. Resultados de los análisis físico-químicos aplicados a las muestras de agua recolectadas.....	65
Tabla 10. Porcentajes de los iones dominantes presentes en las muestras de agua recolectadas (meq/l).....	77
Tabla 11. Rangos permitidos para los parámetros físicos y químicos del agua para el consumo doméstico.....	80
Tabla 12.- Clasificación del agua de acuerdo a la relación de absorción de sodio.....	82
Tabla 13. Valores obtenidos de la relación de absorción de sodio para cada muestra de agua analizada.....	83
Tabla 14. Clasificación del agua según la conductividad eléctrica.....	84

Tabla 15. Datos obtenidos a partir del corte transversal A-A' en la zona ubicada al este del río Macuto, entre los pozos PZ01 y PZ04.....	92
Tabla 16. Datos obtenidos a partir del corte transversal B-B' en la zona ubicada al oeste del río Macuto, entre los pozos PZ03 y PZ07.....	93

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de producción y abastecimiento de agua en Macuto, Estado Vargas, están conformados por una serie de tomas superficiales sobre los ríos de la región, que inicialmente cubrían las necesidades locales de los núcleos urbanos existentes. Posteriormente, a causa del proceso de urbanización que sufrió la zona, los acueductos fueron interconectados y las fuentes de mayor capacidad fueron usadas para complementar el abastecimiento de núcleos que antes estaban fuera de su área de influencia.

Existe una alta vulnerabilidad en el servicio de suministro de agua potable debido a que no se dispone de volúmenes excedentes almacenados para períodos secos. La aducción Maya-Picure, que transporta aproximadamente el 60% del abastecimiento promedio del sistema, se desarrolla en una topografía abrupta con condiciones geológico-geotécnicas complejas; el servicio discontinuo favorece condiciones adversas sobre la calidad del agua en el sistema de distribución. En otro sentido, se presentan fugas en la red, siendo la principal causa de éstas el hecho que la red de distribución ha sido construida sin control por entes privados, alcaldías, la Gobernación, la comunidad y, en muchos casos, no toma en consideración una apropiada distribución de las presiones, las capacidades requeridas de las tuberías, las condiciones del terreno, y otros elementos. Los factores antes señalados dificultan el suministro eficiente del agua necesaria para satisfacer debidamente las necesidades de la población de Macuto.

Sumado a lo anterior, el evento catastrófico de Vargas de diciembre de 1999, afectó considerablemente este servicio. La cobertura del servicio de agua potable a la población era de 80% antes de diciembre de 1.999, después de esa fecha –ocurrido el Evento de Vargas- ese porcentaje se redujo a un 65%.

Los problemas de suministro de agua a Macuto se deben entonces, a que la operación del sistema está determinado por la insuficiencia de las fuentes de producción ante la elevada demanda existente y por la flexibilidad, asociada al cambio de sentido del flujo en la operación de los alimentadores principales y en la

estación de bombeo en Macuto, que permite alimentar desde las fuentes de Oeste al sistema hasta Camurí Grande, o desde el Sistema Naiguatá-Camurí hasta Picure.

De lo anterior se puede apreciar, que los problemas relacionados con el abastecimiento de agua potable en la localidad datan de años atrás, y dichos problemas se incrementaron con el evento de Vargas del pasado diciembre de 1999 debido a los daños que dicho evento provocó sobre los sistemas de producción de agua en el Estado Vargas.

Ahora bien, algunos habitantes de Macuto debido a que no han visto con el paso del tiempo una respuesta efectiva a la solución de la problemática antes planteada por parte de los organismos responsables, se han visto en la necesidad de perforar pozos en la zona con la finalidad de extraer agua subterránea y de esta manera, independizarse en cierta forma del suministro irregular y racionado de agua por parte de HIDROCAPITAL y satisfacer así sus necesidades.

En este sentido, se ha observado que las reservas de aguas subterráneas ubicadas en la zona de Macuto del Edo. Vargas son explotadas, en algunos casos, sin ningún tipo de estrategias y programas, lo que genera problemas de deterioro del acuífero. Por tal motivo, se persigue con la presente investigación, evaluar las características de las aguas, realizar una investigación del comportamiento del flujo subterráneo y las propiedades del ambiente geohidrológico en el cono de Macuto, a objeto de determinar la situación actual del acuífero y presentar propuestas que resulten apropiadas para el uso sustentable de las reservas de aguas subterráneas de la localidad.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las condiciones geohidrológicas y la caracterización físico-química de las aguas subterráneas en el cono aluvial de Macuto con fines de aprovechamiento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un inventario de pozos y sitios de medición de las aguas subterráneas en el cono aluvial de Macuto.
- Analizar los procesos hidrológicos relacionados con la recarga del acuífero.
- Evaluar las condiciones de almacenamiento de agua subterránea en el acuífero.
- Definir las características físico-químicas de las aguas subterráneas y su uso para fines múltiples.
- Proponer un programa de explotación y aprovechamiento de las aguas subterráneas.

3. CONTRIBUCIÓN DEL ESTUDIO

La elaboración del Trabajo Especial de Grado que lleva por título: “GEOHIDROLOGÍA Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL CONO ALUVIAL FORMADO POR EL RÍO SAN JOSÉ DE GALIPÁN, MACUTO, ESTADO VARGAS, constituye un recurso de gran utilidad en el ámbito de las aguas subterráneas, en virtud de la importancia que representa iniciar un estudio geohidrológico en una región del estado Vargas donde existe este recurso hídrico.

Este trabajo representaría una herramienta que permitiría solventar en cierto grado la problemática que está presentando actualmente la población de Macuto, debido al deficiente servicio de suministro de agua potable con el que cuenta, al ofrecerle a los habitantes de la zona, una alternativa para obtener agua mediante la perforación de pozos para la extracción de la misma y aumentar de esta forma, la calidad de vida de los habitantes.

En vista que el río Macuto resulta de la unión del río San José de Galipán y el río Escondido, siendo el primero una cuenca experimental, el estudio puede contribuir a mejorar el conocimiento hidrológico que se persigue en dicha cuenca.

La investigación permitirá adquirir para quienes la llevamos a cabo, una serie de conocimientos en un área de especial interés para nosotros, la Hidrología Subterránea, que consideramos de gran importancia en la actualidad y tendrá un auge para los años venideros. Cabe destacar, que además de los conocimientos que el desarrollo de este tema aportará en torno a la problemática planteada, representa para quienes lo llevamos a cabo, el cumplimiento del último requisito concerniente a la parte académica, indispensable para optar al título de Ingeniero Hidrometeorologista, de la Facultad de Ingeniería de esta honorable Casa de Estudios.

4. UBICACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde al cono aluvial de Macuto, el cual está ubicado geográficamente entre las coordenadas U.T.M. norte 1.173.410-1.173.620 y este 729.815-730.580 y con el ápice en las coordenadas 1.172.080N-730.420E, desde el punto de vista geo-político forma parte de la parroquia Macuto, municipio La Guaira del Estado Vargas. El cono de Macuto tiene un área aproximada de 0,23 km² (23 Has), lo que representa un 2% del área total de la cuenca del río San José de Galipán.



Figura 1.- Ubicación relativa del área de estudio.

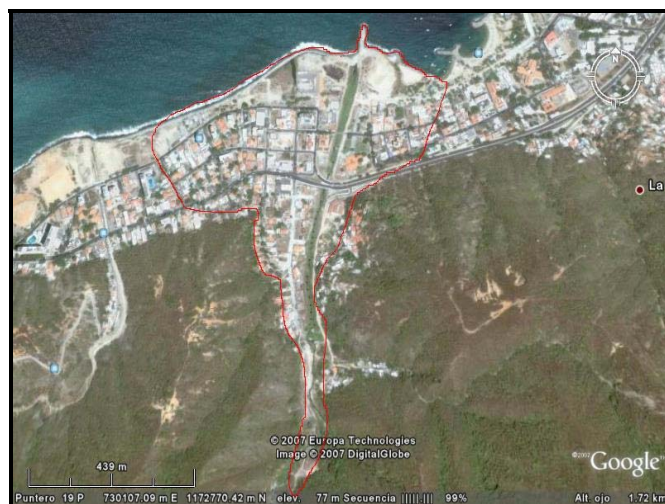


Figura 2.- Cono aluvial de Macuto. Fuente Google Earth 2007. La línea en rojo representa el borde superficial.

5. METODOLOGÍA

El presente trabajo se dividió en cuatro etapas, etapa preliminar, etapa de campo, etapa de laboratorio y etapa de oficina. Las actividades desarrolladas en cada una de las etapas se describen a continuación:

5.1 Etapa Preliminar: esta etapa comprendió la búsqueda de información bibliográfica referente a los temas a desarrollar en el trabajo así como cartografía de la zona de estudio, provenientes de las siguientes fuentes:

- Publicaciones afines.
- Trabajos Especiales de Grado.
- Publicaciones en boletines nacionales e internacionales.
- Estudios realizados en la zona por el Ministerio del Ambiente y Empresas privadas.
- Información meteorológica suministrada por el Ministerio del Ambiente.
- Mapa topográfico de la zona a escala 1:10.000 elaborado por el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar.
- Mapas geológicos y de sedimentos elaborados previamente en Trabajos Especiales de Grado en la zona de estudio.

5.2 Etapa de Campo: esta etapa comprendió el reconocimiento de la zona de estudio y la generación y obtención de datos necesarios para el desarrollo del trabajo mediante las siguientes actividades:

5.2.1 Elaboración del inventario de pozos ubicados en la zona de estudio

- Se inventariaron un total de 10 pozos en el cono aluvial de Macuto, haciendo uso de información suministrada por habitantes del lugar y por empresas constructoras de pozos ubicados en la zona, éstos se ubicaron cartográficamente en el mapa topográfico de la región haciendo uso de las coordenadas U.T.M. generadas por un GPS marca MAGELLAN, al posicionarlo convenientemente sobre cada pozo.

- Con los pozos ya ubicados en el mapa topográfico se determinó, mediante interpolación de la curvas de nivel, la altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) de cada uno de los pozos.
- En base a información suministrada por los propietarios de los pozos y/o por las compañías perforadoras de los mismos, se determinaron las siguientes características:
 - Profundidad (m)
 - Diámetro del forro (plg)
 - Caudal (l/s)
 - Estado del pozo (activo o inactivo)
 - Uso

5.2.2 Medición de niveles estáticos

- Durante el período de exploración de campo se midieron los niveles estáticos en 7 de los 10 pozos inventariados (3 pozos estaban sellados), haciendo uso de una sonda eléctrica de 100 metros de longitud.
- Para determinar los niveles, el cable de la sonda se introduce en cada uno de los pozos y cuando el extremo del cable hace contacto con el agua, se cierra el circuito eléctrico indicativo de la conductividad del agua lo que indica la existencia del agua en el pozo.
- Posteriormente, se retira el cable midiendo con una cinta métrica, la profundidad del nivel estático en el pozo.



Figura 3.- Medición con la sonda eléctrica de los niveles estáticos.

5.2.3 Ejecución de prueba de bombeo

- De los 10 pozos inventariados se seleccionó aquel que fue bombeado a mayor caudal para efectuar la prueba, realizando observaciones en un pozo cercano.
- Se midió la distancia entre el pozo de observación y el pozo de bombeo.
- Antes de realizar las mediciones de niveles en el pozo de observación, se apagó la bomba en el pozo durante 16 horas, midiendo antes su nivel dinámico.
- Se efectuó la medición del nivel estático en el pozo de observación, haciendo uso de la sonda.
- Se dio inicio a la prueba de bombeo con el correspondiente encendido de la bomba durante un período de 8 horas y 40 minutos continuas, aplicando el método de régimen variable a caudal constante.
- Durante el mencionado tiempo se tomaron mediciones del nivel estático en el pozo de observación.
- Una vez transcurrido el tiempo establecido para efectuar la prueba, se midió nuevamente el nivel de bombeo.

5.2.4 Ejecución de pruebas de recuperación

- Se efectuaron pruebas de bombeo en dos pozos ubicados en el cono de Macuto.
- Se realizó la medición del nivel estático haciendo uso de la sonda.
- Posteriormente fue encendida la bomba, midiendo el nivel inicial de bombeo. Debido a la variación de los niveles registrados, dichas mediciones se efectuaron hasta verificar un valor constante.
- Una vez estabilizado el nivel de bombeo, se procedió a apagar la bomba con el objeto de efectuar las mediciones de los niveles de recuperación para intervalos de tiempo determinados, hasta alcanzar la condición inicial de equilibrio (nivel estático).

5.2.5 Recolección de muestras de agua para su análisis físico-químico y recopilación de análisis previos.

- Para fines de comparación del agua superficial con el agua subterránea de los pozos se captó una muestra en el lecho del río a nivel de la presa de Macuto (Figura 4).

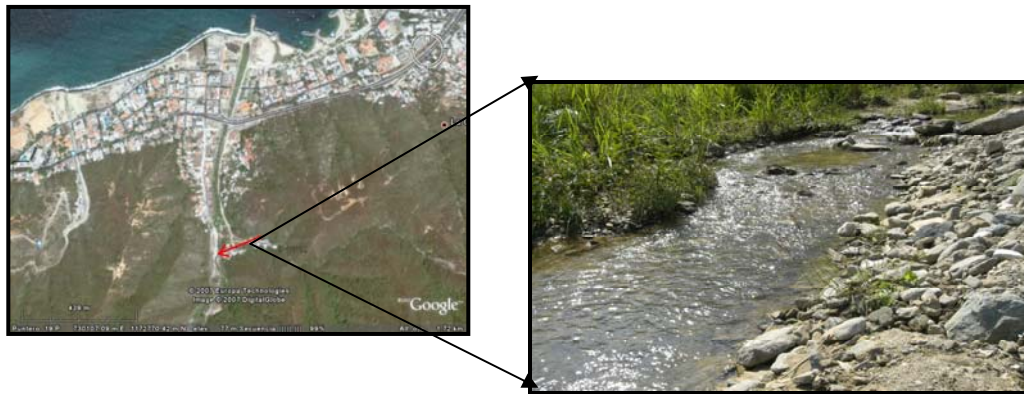


Figura 4. Sitio de captación de la muestra de agua superficial.

- Para uno de los pozos inventariados, nos fue suministrado, por parte de su propietario, un análisis físico-químico reciente que se le había aplicado a muestras de agua tomada del mismo.
- Para otros dos pozos ubicados en el área de estudio se capturaron muestras de agua para realizarles sus respectivos análisis físico-químicos. El muestreo fue realizado después de un lapso continuo de bombeo y las pautas seguidas para recolectar dichas muestras son las siguientes:

*Se utilizaron botellas de vidrio para la recolección y almacenamiento de las muestras.

* Para tomar las muestras se abrió totalmente la llave de distribución del pozo.

* Se reguló el flujo de agua procediendo al llenado de las botellas.

* Para tomar las muestras las botellas a utilizar debieron ser enjuagadas tres veces con el agua del pozo que estaba siendo muestreado.

* Se identificó cada una de las muestras destacando la ubicación del pozo y la fecha en que fueron tomadas.

* Las muestras para análisis físico-químicos fueron refrigeradas para no alterar su composición original durante su traslado al Laboratorio de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Universidad Central de Venezuela en donde fueron analizadas.



Figura 5.- Recolección de la muestra de agua

5.2.6 Recolección de muestras de sedimentos en el vaso sedimentado de la presa Macuto

- Se recolectó el material (aproximadamente 3-4 Kg) mediante excavación del depósito de sedimentos del vaso sedimentado de la presa Macuto, el cual se utilizó para efectuar el análisis granulométrico y determinar mediante un procedimiento de laboratorio, el cálculo de permeabilidad y porosidad.



Figura 6. Sitio de captación de la muestra en el depósito excavado en el vaso del embalse Macuto. Nótese presencia de peñones de 45 cms. de diámetro

5.3 Etapa de Laboratorio: comprende aquellas actividades llevadas a cabo en el laboratorio de sedimentos del Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF) y que se enumeran a continuación:

5.3.1 Tamizado de las muestras de sedimentos

- La muestra de campo se somete a un procedimiento de cuarteo (Figura 7) para seleccionar una parte representativa de la misma, cuyo volumen depende de la textura del material.



Figura 7.- Procedimiento de cuarteo de la muestra de campo.

- Debido a que la muestra obtenida en el paso anterior se encontraba húmeda, fue llevada a la estufa a 101°C y transferida a una campana de desecación con sales higroscópicas para eliminar la humedad.
- Se midió en la balanza digital la masa de la muestra seca.
- Utilizando un juego de tamices con aberturas de la malla entre 4 mm y 0.075 mm, se procedió al tamizado durante 3 minutos, separando previamente las fracciones (partículas) muy gruesas, las cuales fueron pesadas directamente.
- Se pesó la fracción de sedimentos retenidos en cada tamiz.
- Se elaboró la curva granulométrica correspondiente (Figura 11).

5.3.2 Cálculo experimental de la porosidad

- Se colocó en un beaker parte de la muestra secada en la estufa.
- Se le fue agregando agua a la muestra hasta alcanzar su saturación ($S=100\%$)
- El volumen de agua utilizado para lograr la saturación representa el volumen de vacío.
- Finalmente, la relación entre el volumen de vacío y el volumen de la muestra, representa el valor de la porosidad.

5.3.3 Cálculo experimental de la permeabilidad

- La muestra de sedimentos recolectada del vaso del embalse Macuto fue depositada en un permeámetro de carga variable (Figura 8).



Figura 8.- Permeámetro utilizado en el laboratorio del IMF para medir la conductividad.

- A través de la columna ubicada en la parte superior del permeámetro se agregó agua hasta alcanzar saturar la muestra.
- Fue fijada una escala en la columna superior del permeámetro con la finalidad de medir en ella las alturas de la columna de agua. La altura inicial escogida para la escala anterior fue medida a partir de un datum establecido.
- Se midieron los segundos transcurridos para alcanzar cada una de las alturas preestablecidas. Dicho procedimiento se efectuó tres veces a fin de evaluar la consistencia entre los resultados.
- Los resultados anteriores fueron registrados convenientemente en tablas para, posteriormente en la etapa de oficina, determinar el valor de la permeabilidad, mediante las ecuaciones que describen el funcionamiento de este tipo de permeámetros.

5.4 Etapa de Oficina: corresponde al procesamiento de los datos obtenidos en el campo y laboratorio, al efectuar los cálculos pertinentes que permitan elaborar los análisis, recomendaciones y conclusiones para cada uno de los puntos a desarrollar en el trabajo.

6. GEOLOGÍA LOCAL

Los conos aluviales se forman por el aporte lento pero continuo de sedimentos, acarreados por los ríos e intensificados con las crecidas anuales, pero definitivamente marcados por eventos de gran magnitud, que en cuestión de horas o días pueden aportar volúmenes de sedimentos comparables a los registrados durante siglos o milenios de acción lenta. Como resultado de los procesos de sedimentación en el tiempo, en el cono aluvial de Macuto se observan principalmente materiales recientes. La unidad litológica que aflora en el cono corresponde a aluviones recientes (Qal). Esta unidad se orienta en forma general con un rumbo E-W paralelo a la línea de costa y descansa discordantemente sobre las rocas de la Asociación Metamórfica La Costa, específicamente es sustentado por uno de los litodemos constituyentes de esta Asociación conocido como Esquisto de Tacagua. Una pequeña porción del este de la zona de transición del cono, se encuentra en contacto con la unidad Serpentina (sp), perteneciente igualmente a la referida asociación. En cuanto al ápice del cono, éste se encuentra en contacto con la unidad litodémica Augengneis de Peña Mora de la Asociación Metamórfica Ávila, lo anterior ocasiona que en la zona del ápice del cono, se encuentren las mayores acumulaciones de bloques compuestos por augengneis, gneis y esquistos provenientes de la mencionada unidad.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las unidades litológicas vinculadas con el origen del cono de Macuto (Figura 10), en virtud de la influencia que las composiciones mineralógicas de éstas, puedan determinar sobre la estructura y composición de la zona de estudio.

Esquisto de Tacagua (CT): la unidad se presenta como una franja alargada orientada paralela a la línea de costa y aflora en las laderas que descienden a la urbanización Macuto tanto del lado este como del oeste. Al norte está en contacto con los sedimentos recientes, mientras que al sur se encuentra en contacto de Falla (traza de la falla de Macuto) con la Asociación Metamórfica Ávila. Esta unidad está constituida fundamentalmente por tres tipos de rocas: el esquisto formado por cuarzo, mica muscovítica y cantidades menores pero siempre presentes de grafito, así como

cantidades variables de calcita y/o albita (López, 2006). Se encuentra mármol más o menos puro y gradando a esquistos cálcicos. Posee avanzados grados de meteorización a veces de tipo laterítico, donde la arcilla predominante es la illita. El esquisto grafitoso muestra una intensa foliación, y en las variedades menos cuarcíferas y más micáceas, pueden gradar a rocas con aspecto filítico o pizarroso. Los movimientos de masa en esta unidad fueron durante el lapso del evento Vargas 1999 mayoritariamente flujos torrenciales, aportando abundante cantidad de materiales de granulometría predominantemente fina de colores oscuros que se desplazaron como flujos de lodo a la zona de Macuto.

Serpentinita (sp): se encuentra en contacto de falla al sur (Falla Macuto) con la Asociación Metamórfica Ávila, y está flanqueado por el Esquisto de Tacagua al norte, este y oeste. Esta unidad se encuentra muy diaclasada y fracturada, presenta baja dureza debido al grado de fracturamiento y la foliación es poco marcada.

Augengneis de Peña Mora: aflora en el río Macuto en la zona de confluencia del Río San José de Galipán y el Río Escondido. Esta unidad se caracteriza por presentar colores claros, notándose las zonas blancas de los minerales cuarzo y feldespatos, intercaladas con niveles más oscuros principalmente de biotita. Mineralógicamente, es un gneis cuarzo-feldespático-micáceo de composición granítica.

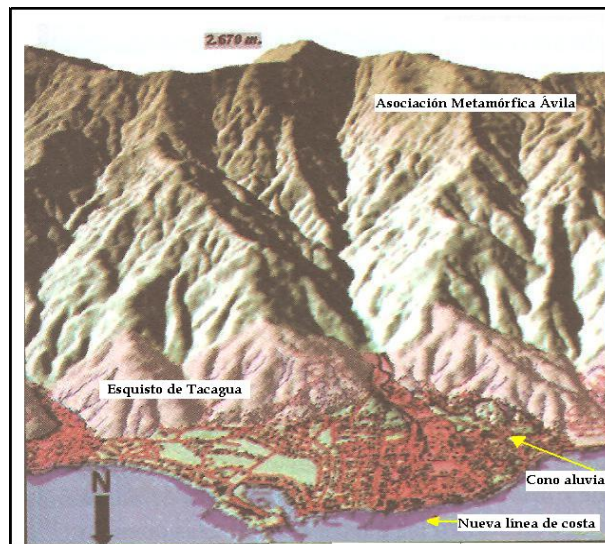


Figura 9.- Esquema de la geología del macizo del Ávila. Tomado de Urbani (2000).

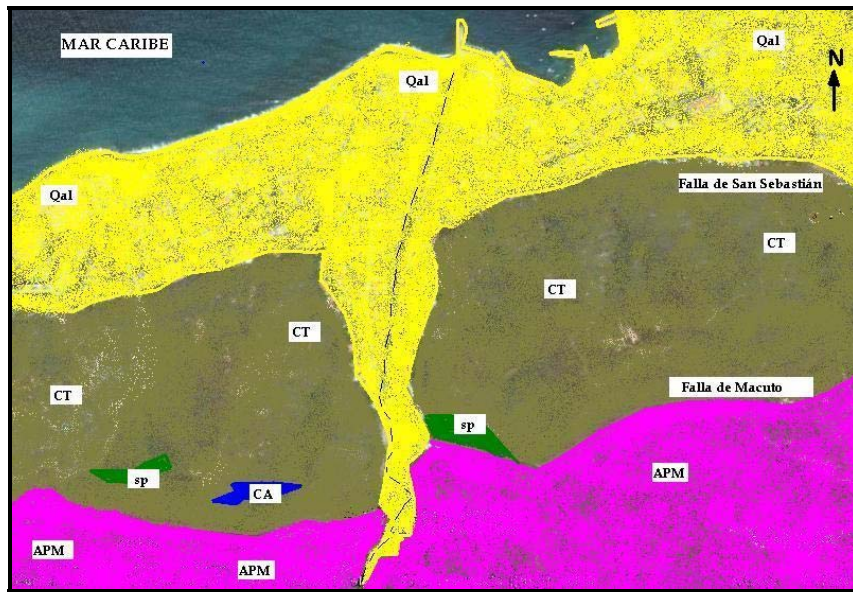


Figura 10.- Unidades litológicas presentes en la zona de estudio.

Leyenda

Unidades litológicas

Rocas sedimentarias

Qa1 Aluvión (Cuaternario)

Rocas Ígneo-Metamórficas

Asociación Metamórfica La Costa (Mesozoico)

CT Esquisto de Tacagua

CA Mármol de Antímamo

sp Serpentinita

Asociación Metamórfica Ávila (Pre-Mesozoico)

APM Augengneis de Peña Mora

7. DESCRIPCIÓN DEL CONO ALUVIAL DE MACUTO

En el sector septentrional de la cordillera del Ávila se ha desarrollado un conjunto prominente de conos aluviales que han resultado del aporte de materiales de numerosos cauces torrenciales. El cono aluvial de Macuto es uno de estos y presenta un área de 0.23 Km², con una forma triangular, con ensanchamiento notable a partir del la zona de transición de la montaña hacia la costa, tiene una extensión longitudinal de 1873 m, de los cuales 725 m corresponden a la zona de transición y 1148 m, a la parte más desarrollada del mismo. Presenta un ancho máximo de 623 m.

A partir del punto de unión de los ríos San José de Galipán y Escondido entre las cotas 175 y 150 msnm el patrón de drenaje se caracteriza por ser sub-paralelo oblicuo, y el Río Macuto presenta fuerte disección en el valle y los depósitos aluviales hasta la cota 400 m.s.n.m. Luego el cauce se ensancha notablemente hasta su desembocadura en el mar formando el cono de Macuto. Por otro lado, los cauces tributarios en la parte montañosa son pocos, encajonados y con valles estrechos.

Algunos han clasificado los conos aluviales según el régimen climático en el cual éstos se desarrollan, teniendo así los formados en climas áridos o semiáridos cuyos materiales son suministrados mayormente por flujos controlados por efecto de la gravedad y los conos formados en ambientes de climas húmedos formados por flujos torrenciales. En el cono de Macuto, como en muchos otros de la zona, se considera que los dos mecanismos han ejercido papel significativo en su génesis. En cuanto a la formación del cono, existen tres condiciones que contribuyeron a su desarrollo:

1. Una zona topográfica con alto relieve y elevadas pendientes, con una zona de transición donde el canal o un conjunto de ellos, se abren y discurren sobre una zona baja y llana al salir de la zona del cañón de la cuenca hidrográfica
2. Un amplio suministro de sedimentos, detritus y materia orgánica vegetal (troncos de árboles) procedentes de la cuenca que contribuyó a la formación del depósito aluvial.

3. Existencia de precipitaciones elevadas e intensas que generan suficiente escorrentía para originar una saturación en los suelos, que favorezcan arrastres torrenciales y movimientos de masa.

Los procesos sedimentarios que originaron a los abanicos aluviales en el Litoral Central, involucran cantidades de energía de magnitudes superiores a las que han estado presentes en los procesos sedimentarios normales, siendo los flujos torrenciales convulsivos (esporádicos) los causantes de la depositación de los sedimentos que conforman el cono aluvial. Estos procesos ocurren durante continuas y progresivas etapas geológicas, durante las cuales ocurren mecanismos de acumulación, erosión, resuspensión, migración lateral de canales dentro del cono, entre otros.

Características granulométricas de los materiales en el cono

De manera general se aprecia que las gravas gruesas son mucho más abundantes en el ápice del cono, las partículas de tamaños intermedios se encuentran en la zona media del abanico y los sedimentos de granulometría más finas tienden a acumularse en la parte distal del abanico. Estos sedimentos recientes, están representados básicamente por materiales gruesos de carácter gravo-arenoso, que han sufrido mezclas sucesivas y resuspensión, debido a la acción de los flujos sobre los diferentes sectores del cono.

Haciendo uso de los 952,6 g de material aluvial recolectado en el depósito del vaso del embalse Macuto, se efectuó un análisis granulométrico con la finalidad de clasificar las partículas que lo componen y determinar, el porcentaje de las diferentes fracciones en la muestra. Los resultados obtenidos (Tabla 1) se muestran a continuación:

Tabla 1. Valores obtenidos del tamizado de las muestras de sedimentos del vaso del embalse Macuto.

N° tamiz	Abertura del tamiz (mm)	Peso Retenido (g)	Peso corregido (g)	% retenido	Peso acumulado (g)	% acumulado	% más fino
1	25	294,89	295,06	30,97	295,06	30,97	69,03
5	4	270,45	270,62	28,41	565,69	59,38	40,62
6	3,35	22,89	23,06	2,42	588,75	61,80	38,20
10	2	67,83	68,00	7,14	656,76	68,94	31,06
18	1	95,38	95,55	10,03	752,31	78,97	21,03
45	0,355	115,67	115,84	12,16	868,16	91,14	8,86
60	0,250	26,22	26,39	2,77	894,55	93,91	6,09
80	0,180	18,80	18,97	1,99	913,53	95,90	4,10
120	0,125	15,05	15,22	1,60	928,75	97,50	2,50
200	0,075	11,58	11,75	1,23	940,51	98,73	1,27
PAN	PAN	11,92	12,09	1,27	952,60	100,00	0,00
Total		950,68	952,60	100,000			

Para una mejor interpretación de los resultados anteriores, y considerando que en el lugar de captación de la muestra se observó la presencia de peñones de 45 cm de diámetro, se graficaron los porcentajes más finos obtenidos en función de la abertura del tamiz (escala logarítmica), obteniéndose el siguiente gráfico:

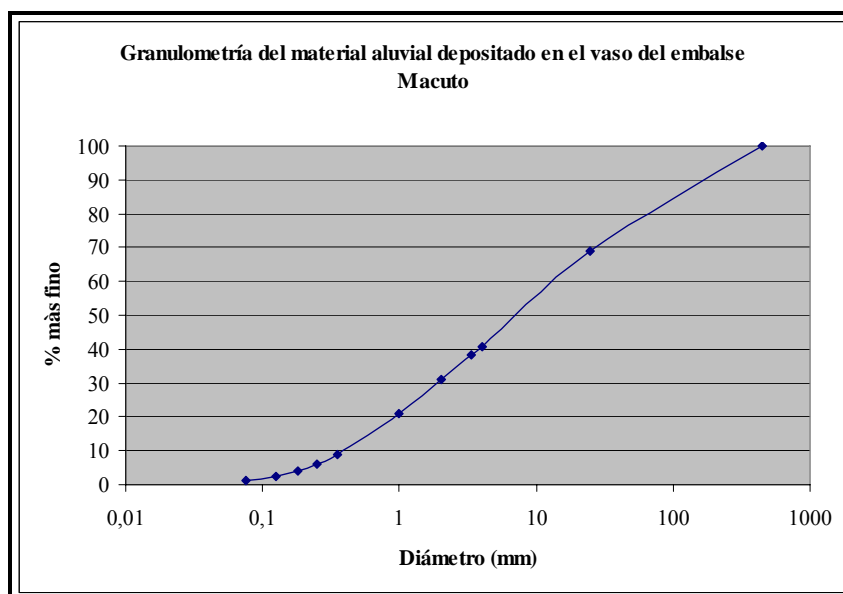


Figura 11. Granulometría del material aluvial depositado en el vaso del embalse Macuto.

En este trabajo se sigue la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) para clasificar las partículas de la muestra recolectada según el tamaño. Aplicando dicho criterio a los resultados obtenidos, se determina para la muestra recolectada un 31 % formada por grava gruesa, 38 % arena gruesa, 10 % arena media, 20 % arena fina y 1 % de partículas finas (limos, arcillas, coloides). Debido a que el material recolectado del vaso del embalse Macuto, representa lo que debe ser la composición de partículas en el cono de Macuto, se tiene que éste se encuentra compuesto en mayor porcentaje por arenas gravosas.

Es de señalar, que durante las perforaciones de algunos pozos en áreas adyacentes al cuerpo principal del cono se detectaron peñones de diámetros de hasta 2 m a profundidades de 6 m, lo que sugiere que es posible encontrar estos bloques distribuidos erráticamente, dentro de la masa del material sedimentario que constituye el cono. Estos elementos no se aprecian en superficie, como resultado de los más recientes eventos catastróficos de arrastres de materiales acontecidos en el estado Vargas, sin embargo, no quiere esto decir, que no estén presentes en el depósito del subsuelo, como resultado de preexistentes acontecimientos asociados a flujos de lodo y torrenciales. Se observa finalmente, que factores como el urbanismo reciente y la remoción de materiales con maquinaria pesada, actuando como elementos asociados a la actividad antrópica, han afectado la estructura y disposición de los materiales en el cono.

En la actualidad el canal del río Macuto se encuentra revestido de concreto en el fondo y con gaviones en sus paredes habiéndose desarrollado abundante vegetación de gramíneas y arbustos (figura 12), mientras que un elevado porcentaje de la superficie del cono, se encuentra impermeabilizado. Estas condiciones modifican la infiltración y recarga hacia el acuífero, aspectos que serán tratados más adelante.

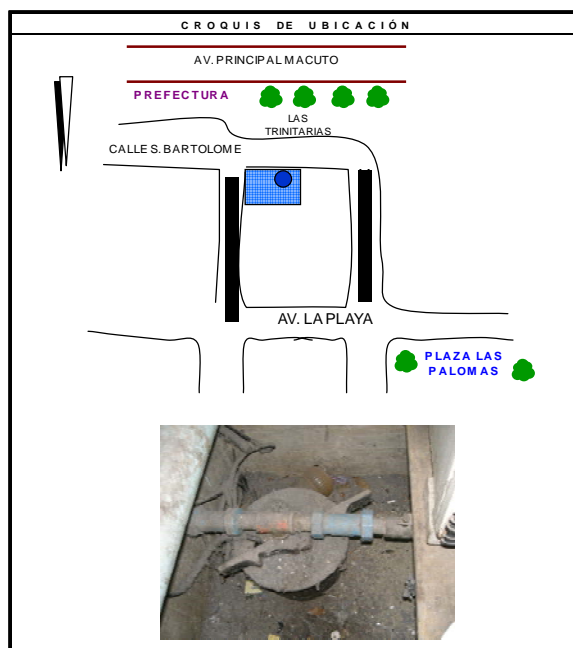


Figura 12. Canal del río Macuto revestido con gaviones. Vista aguas abajo de la presa Macuto.

8.1 Ubicación y características principales de los pozos

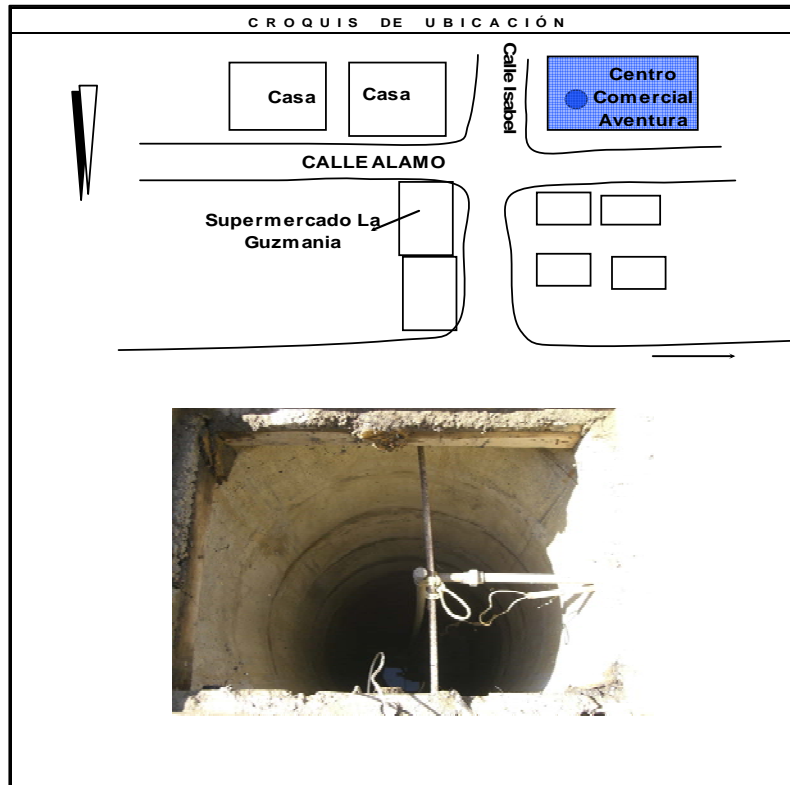
La ubicación detallada de cada uno de los pozos así como sus características principales se muestran a continuación:

Pozo de la Lavandería Bartolomé (PZ08)



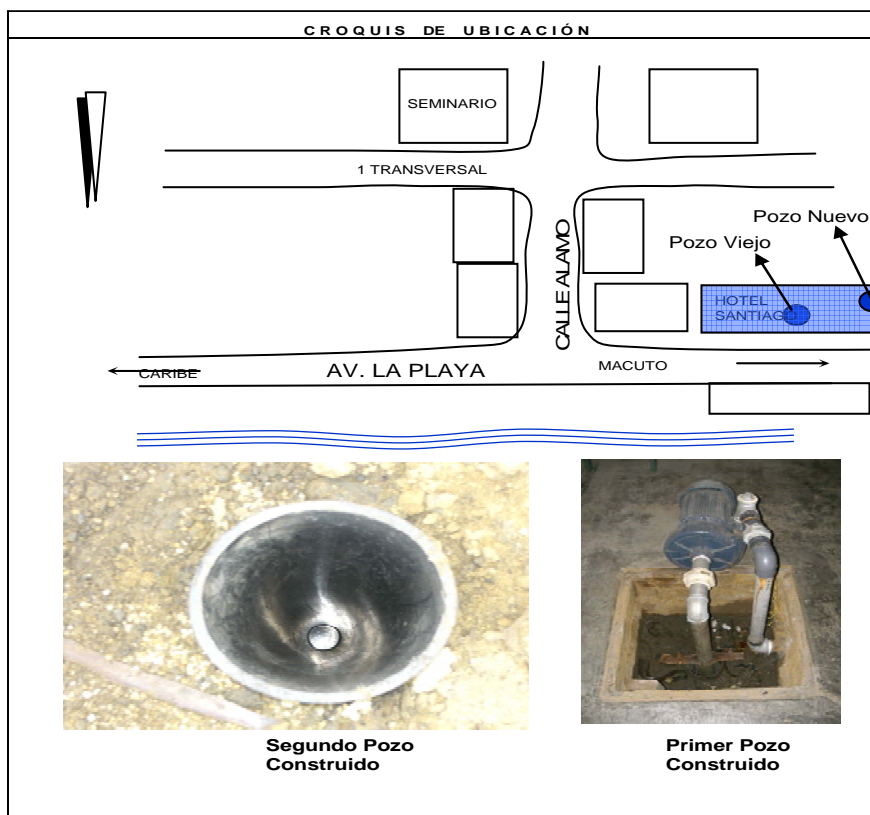
Características del pozo	
Ubicación	
Coordenadas geográficas	
Latitud	10°36'27"
Longitud	66°53'36"
Coordenadas U.T.M.	
Norte	1173374.2
Este	730436.5
Profundidad del pozo (m)	30
Diámetro (")	5
Caudal bombeado (l/s)	1
Años de construido	2003
Estado actual	
Activo	X
No activo	
Uso del agua	
Doméstico	X
Urbano	
Agrícola	
Comercial	
Fecha de inventario	13/09/2007

Pozo del Centro Comercial Aventura (PZ03)



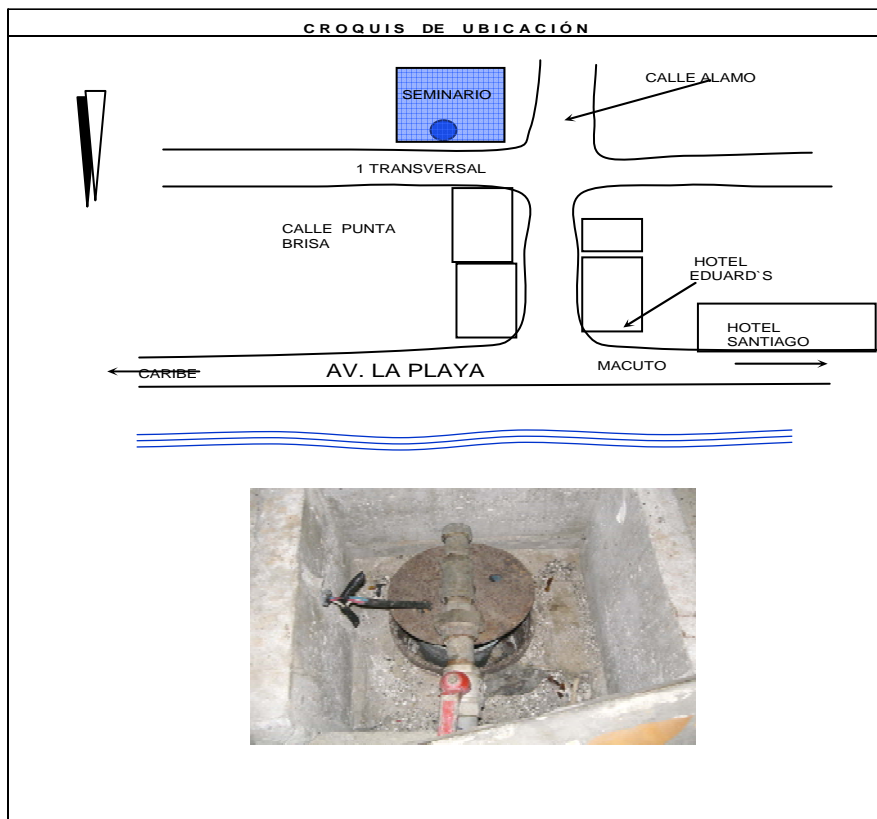
Características del pozo	
Ubicación	
Coordenadas geográficas	
<i>Latitud</i>	10°36'26"
<i>Longitud</i>	66°53'47"
Coordenadas U.T.M.	
<i>Norte</i>	1173332
<i>Este</i>	730155
<i>Profundidad del pozo (m)</i>	12
<i>Diámetro (")</i>	44
<i>Caudal bombeado (l/s)</i>	-
<i>Año de construcción</i>	2007
Estado actual	
<i>Activo</i>	
<i>No activo</i>	X
Uso futuro del agua	
<i>Doméstico</i>	X
<i>Urbano</i>	
<i>Agrícola</i>	
<i>Comercial</i>	
Fecha de inventario	13/09/2007

Pozo del Hotel Santiago (PZ06 y PZ07)



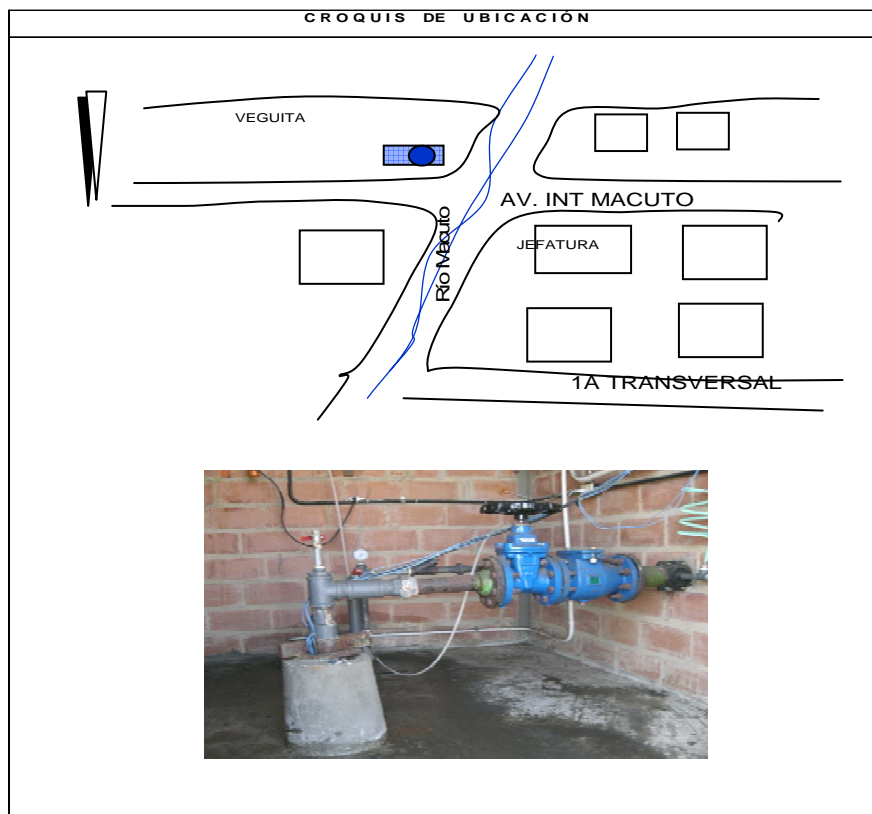
Características del pozo	Primer pozo	Segundo pozo
Ubicación	(PZ07)	(PZ06)
Coordenadas geográficas		
Latitud	10°36'28"	10°36'28"
Longitud	66°53'57"	66°53'58"
Coordenadas U.T.M.		
Norte	1173394	1173394
Este	729852	729832
Profundidad del pozo (m)	32	24
Diámetro (")	6	8
Caudal bombeado (l/s)	2.3	5.04
Año de construcción	-	2007
Estado actual		
Activo	X	X
No activo		
Uso del agua		
Doméstico	X	X
Urbano		
Agrícola		
Comercial		
Fecha de inventario	13/09/2007	

Pozo del Seminario San Pedro Apóstol (PZ02)



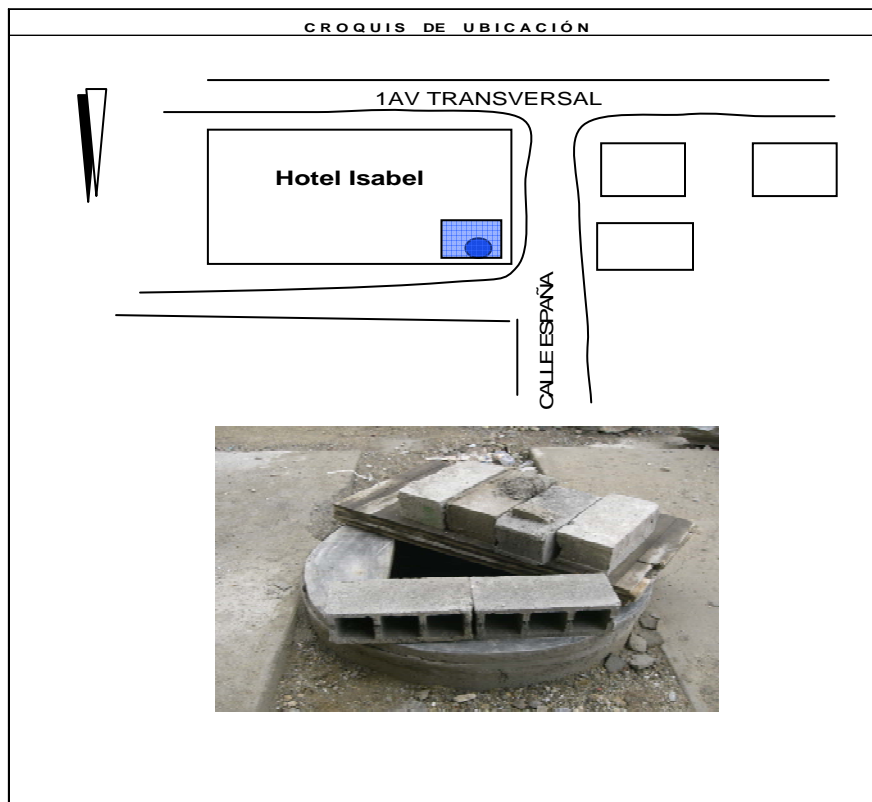
Características del pozo	
Ubicación	
Coordenadas geográficas	
<i>Latitud</i>	10°36'29"
<i>Longitud</i>	66°53'53"
Coordenadas U.T.M.	
<i>Norte</i>	1173430
<i>Este</i>	729993
<i>Profundidad del pozo (m)</i>	20
<i>Diámetro (")</i>	5
<i>Caudal bombeado (l/s)</i>	1
<i>Años de construcción</i>	2001
Estado actual	
<i>Activo</i>	X
<i>No activo</i>	
Uso del agua	
<i>Doméstico</i>	X
<i>Urbano</i>	
<i>Agrícola</i>	
<i>Comercial</i>	
Fecha de inventario	13/09/2007

Pozo de la Veguita (PZ01)



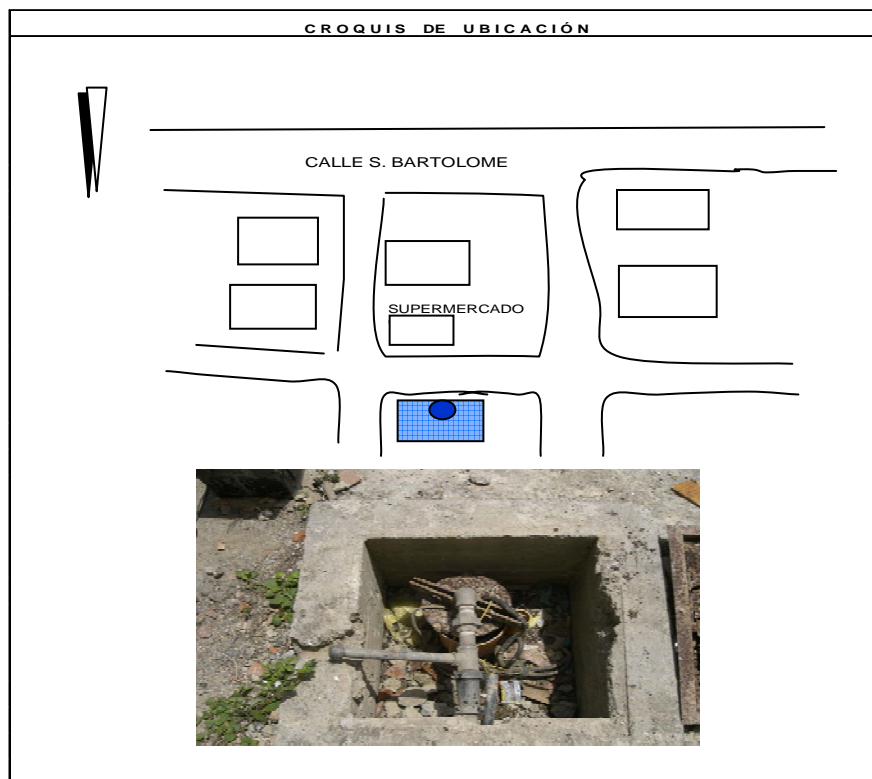
Características del pozo	
Ubicación	
Coordenadas geográficas	
Latitud	10°36'25"
Longitud	66°53'44"
Coordenadas U.T.M.	
Norte	1173317
Este	730265
Profundidad del pozo (m)	41
Diámetro (")	6
Caudal bombeado (l/s)	12 (lluvia) 7 (sequía)
Año de construcción	2006
Estado actual	
Activo	X
No activo	
Uso del agua	
Doméstico	X
Urbano	
Agrícola	
Comercial	
Fecha de inventario	13/09/2007

Pozo del Hotel Isabel (PZ05)



Características del pozo	
Ubicación	
Coordenadas geográficas	
<i>Latitud</i>	10°36'30"
<i>Longitud</i>	66°53'49"
Coordenadas U.T.M.	
<i>Norte</i>	1173471
<i>Este</i>	730089
<i>Profundidad del pozo (m)</i>	10
<i>Diámetro (")</i>	46
<i>Caudal bombeado (l/s)</i>	-
<i>Año de construcción</i>	2007
Estado actual	
<i>Activo</i>	
<i>No activo</i>	X
Uso futuro del agua	
<i>Doméstico</i>	X
<i>Urbano</i>	
<i>Agrícola</i>	
<i>Comercial</i>	
Fecha de inventario	13/09/2007

Pozo del Hotel Colonial (PZ04)



Características del pozo	
Ubicación	
Coordenadas geográficas	
<i>Latitud</i>	10°36'31"
<i>Longitud</i>	66°53'34"
Coordenadas U.T.M.	
<i>Norte</i>	1173512
<i>Este</i>	730551
<i>Profundidad del pozo (m)</i>	23
<i>Diámetro (")</i>	6
<i>Caudal bombeado (l/s)</i>	1.5
<i>Años de construido</i>	2004
Estado actual	
<i>Activo</i>	X
<i>No activo</i>	
Uso del agua	
<i>Doméstico</i>	X
<i>Urbano</i>	
<i>Agrícola</i>	
<i>Comercial</i>	
Fecha de inventario	13/09/2007

8.2 Utilización del agua subterránea

El agua extraída de los pozos ubicados en el cono de Macuto se emplea actualmente con fines de consumo doméstico. A partir de los valores de caudales extraídos por cada uno de los pozos y de sus respectivos tiempos de bombeo, se determina en este apartado, el volumen de agua que anualmente se utiliza de las reservas contenidas en el acuífero bajo estudio.

En la tabla 2 se identifican en la columna (1) los pozos inventariados, en la (2) los caudales extraídos de cada uno de los mismos, en (3) se observan las horas diarias en que las bombas de los pozos se encuentran extrayendo agua, en (4) se señala la cantidad de días del año en los que se extrae agua subterránea, finalmente, el volumen de agua extraída anualmente (5) es el producto del caudal de extracción multiplicado por el tiempo dados en las columnas anteriores, efectuando las debidas transformaciones de unidades.

Tabla 2. Volúmenes de agua subterránea extraída anualmente de los pozos ubicados en el cono de Macuto

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
POZO	Caudal extraído (l/s)	Tiempo diario de bombeo (h)	Días de uso al año	Volumen de agua extraída al año (l/año)x10 ⁶
PZ01	7	24	121	73,20
	12	24	244	253
PZ02	1	24	144	12,44
PZ03*	-	-	-	-
PZ04	1,5	24	365	47,30
PZ05*	-	-	-	-
PZ06	5	5	365	32,90
PZ07	2,3	7	365	21,15
PZ08	1	3	144	1,60
PZ09	1,5	14	365	27,60
PZ10	1	7	365	9,20
			Total (l/año)x10 ⁶	478,40

(*) No se tienen valores para estos pozos ya que aún no se encuentran en funcionamiento.

De esta manera, el volumen anual extraído de las reservas de aguas subterráneas almacenadas en el cono de Macuto es igual a 478.400 m³. Suponiendo un consumo de 200 l/persona*día se tiene que con el volumen anterior, se satisfacen las necesidades de agua potable para aproximadamente 6.554 personas.

9. FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

9.1 Líneas Isopiezas (Potenciométricas)

Las líneas isopiezas representan líneas de igual altitud (potencial) de agua subterránea, para referirlas al nivel del mar dichas cotas se obtienen en un pozo mediante la diferencia entre la cota de la superficie del terreno y la profundidad del nivel estático, estas establecen la morfología de la superficie potenciométrica en un acuífero para un tiempo determinado, y son útiles para obtener información sobre las características relevantes del agua subterránea en un acuífero, tales como zonas de recarga, drenaje, límites de zonas y contactos, profundidad de la superficie equipotencial, dirección del flujo subterráneo, determinación del tipo de acuífero, gradiente hidráulico promedio.

Se realizaron las mediciones del nivel estático en 7 pozos localizados en el área de estudio durante el mes de septiembre del año 2007, este mes está comprendido dentro del período de lluvias, esta información se presenta en la tabla 3, al igual que la cota de la superficie del terreno (columna 3) y el nivel piezométrico (columna 5) para cada uno de los pozos.

Tabla3. Niveles Piezométricos para el mes de Septiembre de 2007.

Cono de Macuto Edo. Vargas

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Pozo	Identificación	Cota superficie del terreno (m.s.n.m)	Nivel Estático (m)	Nivel Piezométrico (m)
Veguita	PZ01	13,81	5,23	8,58
Seminario San Pedro	PZ02	8,61	7,37	1,24
C.Comercial Aventura	PZ03	14,10	6,09	8,01
Hotel Colonial	PZ04	4,60	3,44	1,16
Hotel Isabel	PZ05	7,80	7,00	0,80
Hotel Santiago	PZ06	4,50	4,83	-0,33
Hotel Santiago	PZ07	5,00	4,45	0,55
Lavandería	PZ08	8,00	*	*
Hotel Eduard's	PZ09	4,00	*	*
Residencias La Estrella	PZ10	4,50	*	*

(*) No se dispone de la información ya que los pozos se encontraban sellados.

A través de la información de la tabla 3, se representa el mapa piezométrico (Figura 14) y se trazan las líneas de flujo correspondientes.

729500

730000

730500

731000

CONO ALUVIAL DE MACUTO
 MAPA PIEZOMÉTRICO
 SEPTIEMBRE 2007

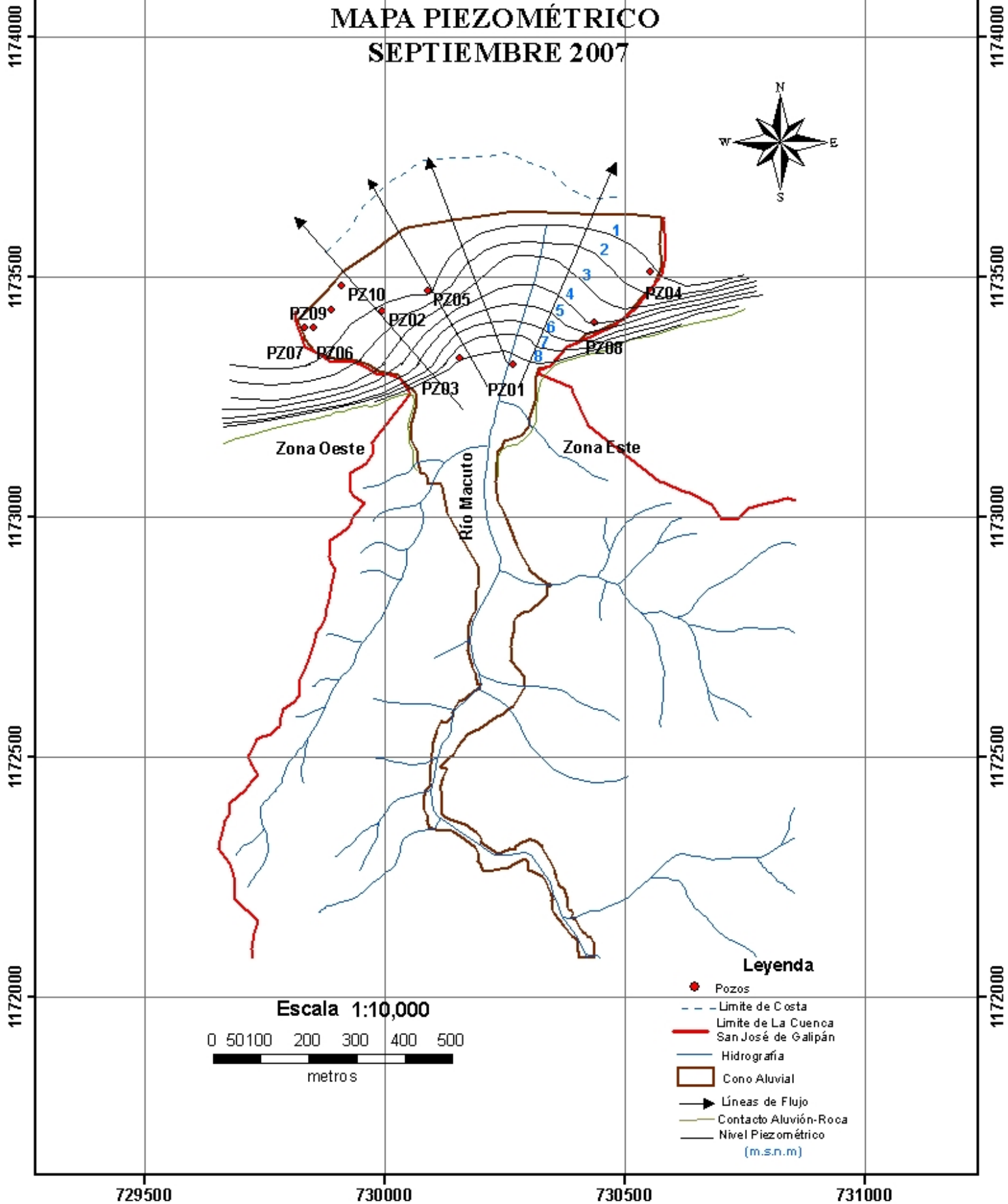


Figura14. Mapa Piezométrico en el sector del Cono Aluvial de Macuto

9.2 Mapa Isopiécico (potenciométrico)

En la figura 14, las zonas más elevadas de nivel freático se encuentran ubicadas en sector del pozo PZ01 del área en estudio, alcanzando los 8.58 m.s.n.m, mientras que la cota piezométrica más baja medida corresponde al pozo PZ06 con 0.33 m.s.n.m.

Otras de las características importantes que se observa en la misma figura, es el espaciamiento de las diferentes curvas isopiezas, lo que implica la gran heterogeneidad del medio y la variabilidad del gradiente hidráulico entre diferentes sectores. En la sección NW al Río Macuto, la separación entre las curvas es estrecha mientras que en el sector NE la separación se hace mucho más suave, en ambos casos se evidencia que conforme decrecen los niveles del agua subterránea el espaciamiento entre las curvas crece, por lo tanto el gradiente hidráulico disminuye.

La dirección del flujo subterráneo se obtuvo mediante el trazado de las líneas perpendiculares a las curvas de isopiezas, de donde las direcciones predominantes del flujo son en sentido NE y NW con respecto al trazado del Río Macuto.

9.3 Interpretación de la superficie potenciométrica

Se observa que en la figura 14 las líneas de flujo divergen desde el Río Macuto lo que nos permite clasificarlas como una superficie radial divergente, estas son muy características de los conos aluviales (Castany 1969), y debido a esto, se establece que el Río Macuto es el causante de la recarga en el acuífero.

Para el análisis de la variación de la permeabilidad en la dirección de una línea de corriente y sabiendo que el gradiente hidráulico disminuye en la dirección del escurrimiento subterráneo, se tiene que, considerando dos sectores en los cuales en uno de ellos existen valores de conductividad hidráulica K_1 y gradiente $(dh/dx)_1$, en el otro sector sean K_2 y $(dh/dx)_2$ los valores de conductividad y gradiente respectivamente; siendo $(dh/dx)_2/(dh/dx)_1 < 1$, luego aplicando la ley de Darcy (suponiendo que la velocidad del flujo es constante en los dos sectores) tenemos que:

$$V_1 = V_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$K_1 \left(\frac{dh}{dx}\right)_1 = K_2 \left(\frac{dh}{dx}\right)_2 \dots\dots\dots (2)$$

Haciendo uso de las expresiones anteriores se concluye que $K_1 < K_2$

Debido a la divergencia de las líneas de corriente y al espaciamiento entre las curvas piezométricas, se pueden diferenciar dos zonas; la zona este y la zona oeste referida a la posición del Río Macuto.

9.3.1 Zona oeste del río Macuto

En esta se encuentra la mayor densidad de pozos de captación subterránea, presenta un espaciamiento pequeño entre las curvas isopiezas y un gradiente hidráulico medio de 3,5 % , no obstante dicho espaciamiento aumenta en la dirección del flujo, lo que quiere decir que la permeabilidad aumenta en esa dirección.

Al utilizar el gradiente hidráulico medio antes determinado (dh/dx), la permeabilidad $-K-$ y la porosidad $-p-$ (estas dos últimas calculadas en detalles en un apartado posterior de este trabajo), se determina la velocidad de filtración $-V_f-$ mediante la siguiente expresión:

$$V_f = \frac{K(m/día)}{p} \frac{dh}{dx} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

$$K = 22 \text{ m/día}$$

$$p = 24 \%$$

$$dh/dx = 3.5 \%$$

Sustituyendo en (3):

$$V_f = \frac{22 \text{ m/día} \times 0.035}{0.24} = 3.2 \text{ m/día}$$

9.3.2 Zona este del río Macuto

En esta zona el espaciamiento entre las curvas isopiezas es más constante, pero de mayor amplitud que en el sector del este, es decir que el gradiente hidráulico es menor a la de dicho sector. Efectivamente el gradiente hidráulico medio es igual a 2,1 %, igualmente la tendencia del espaciamiento entre las curvas es a aumentar en el sentido de la dirección del flujo (gradiente hidráulico disminuye) por lo que la permeabilidad aumenta.

La velocidad de filtración $-V_f$ para esta zona se determina empleando los mismos valores de permeabilidad y porosidad usados en la zona oeste, mientras que el gradiente hidráulico medio corresponde al característico para este sector (2,1 %). Así, sustituyendo en (3) los valores correspondientes se tiene:

$$V_f = \frac{22m/día \times 0.021}{0.24} = 1.9 \text{ m/día}$$

10. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL ACUÍFERO

Los parámetros hidráulicos más importantes que se pueden obtener en los acuíferos son: el coeficiente de almacenamiento, la conductividad hidráulica, la transmisividad y la velocidad de filtración entre otros. En su determinación se utilizan métodos de mediciones de campo entre los cuales los más comunes consisten en pruebas de bombeo; los métodos de laboratorio que requieren recolectar muestras de campo ya sea de los pozos o de los materiales expuestos en la superficie del terreno y usando técnicas de permeametría, de capilaridad o de filtraciones en modelos físicos se logran evaluar algunas de las propiedades antes mencionadas y finalmente, existen métodos para determinarlas en forma indirecta, mediante modelos teóricos utilizando las propiedades de los materiales tales como su granulometría, porosidad, índice de vacíos etc.

La transmisividad (T) del material, se define como el caudal que filtra a través de una faja vertical de terreno de ancho unitario y de altura igual a la del estrato permeable saturado bajo un gradiente hidráulico unitario a una temperatura determinada (la prevaleciente del agua en el acuífero). Esta se determina mediante el producto del espesor saturado del acuífero y la permeabilidad (K), siendo esta última, la mayor o menor facilidad que ofrece un material, de dejar pasar el agua por entre los espacios intersticiales o lo que es lo mismo, es la capacidad de un medio poroso para transmitir agua.

Para la determinación de la transmisividad (T), se utilizaron métodos de campo a través de pruebas de recuperación, esta se hace mediante la suspensión del bombeo, en el cual tanto el nivel del agua en el pozo de bombeo como en los de observación, se recuperan debido a la recarga (Q^+) que en teoría produce un pozo de recarga al acuífero, similar al que actuaba durante la etapa de bombeo (Q^-). El régimen de recuperación es variable hasta que se estabiliza el nivel en busca de su condición de equilibrio (Nivel Estático).

En la figura 15 se pueden observar las variaciones de los diferentes niveles del agua en un pozo cuando se realiza una prueba de bombeo y luego cuando se detiene

el bombeo al iniciarse la recuperación, donde las observaciones que se hacen en el pozo son las del nivel dinámico, datos con los cuales se calcula el abatimiento residual (s_r) y la recuperación (s_R).

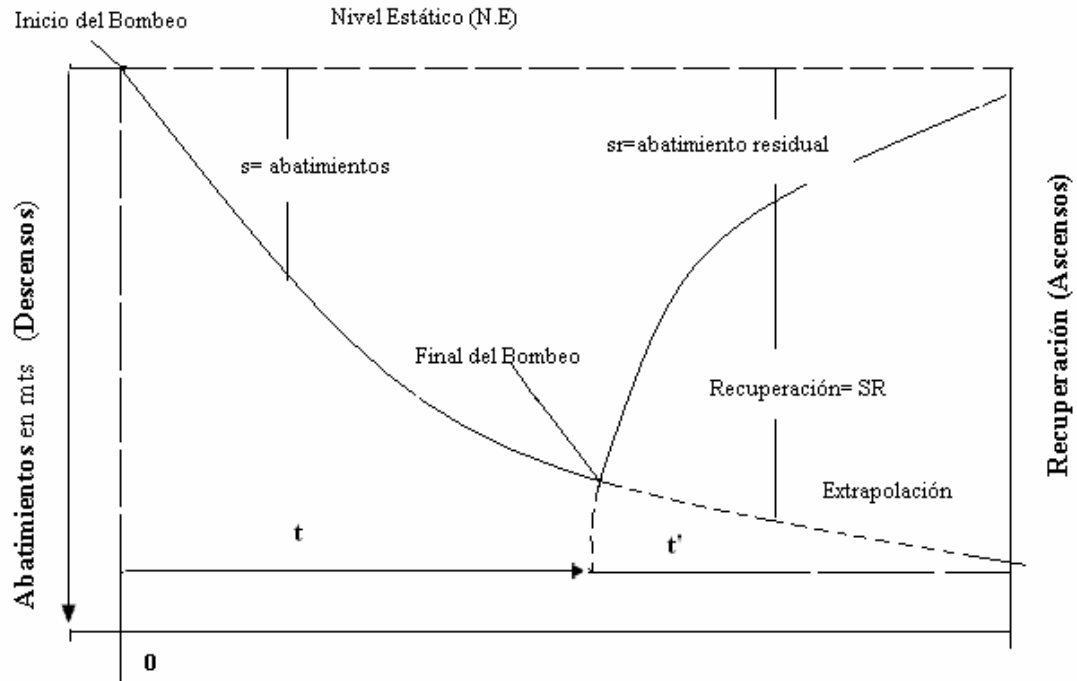


Figura 15.- Curvas de abatimiento y recuperación de una prueba de bombeo a caudal constante

En la figura 15 se puede observar que para cada instante:

s_r = nivel dinámico – nivel estático.

s_R = nivel final de bombeo – nivel dinámico.

t = es el tiempo desde que se inició el bombeo.

t' = es el tiempo desde el instante que se paró el bombeo

10.1 Determinación de los parámetros mediante métodos de campo

En la zona de estudio se realizaron dos ensayos de recuperación, el primer ensayo se realizó en el pozo antiguo (PZ07) del Hotel Santiago y el segundo en el pozo nuevo (PZ06).

10.1.1 Primera prueba de recuperación

Tabla 4. Datos obtenidos de la prueba de recuperación en el pozo PZ07 realizada el 27/09/07

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Tiempo al inicio de la prueba (t (min))	Tiempo desde que se detuvo el bombeo (t'(min))	(t / t')	Nivel Dinámico (m)	Descenso residual (m)	Recuperación (m)
1441.35	1.35	1067.67	4.5	0.10	0.59
1445.10	5.10	283.35	4.48	0.08	0.61
1449.98	9.98	145.24	4.47	0.07	0.62
1455.08	15.08	96.47	4.46	0.06	0.63
1485.08	45.08	32.94	4.45	0.05	0.64
1500.00	60.00	25.00	4.44	0.04	0.65

En esta prueba de recuperación realizada en el pozo PZ07 el caudal de bombeo fue de $Q_b=2,3$ lps, el radio del pozo $r_w=0.0762$ m (3''), Nivel estático= 4,40 m , Nivel Final de bombeo= 5,09 m.

A continuación, en la figura 16, se observa la variación de los niveles dinámicos una vez cesado el bombeo.

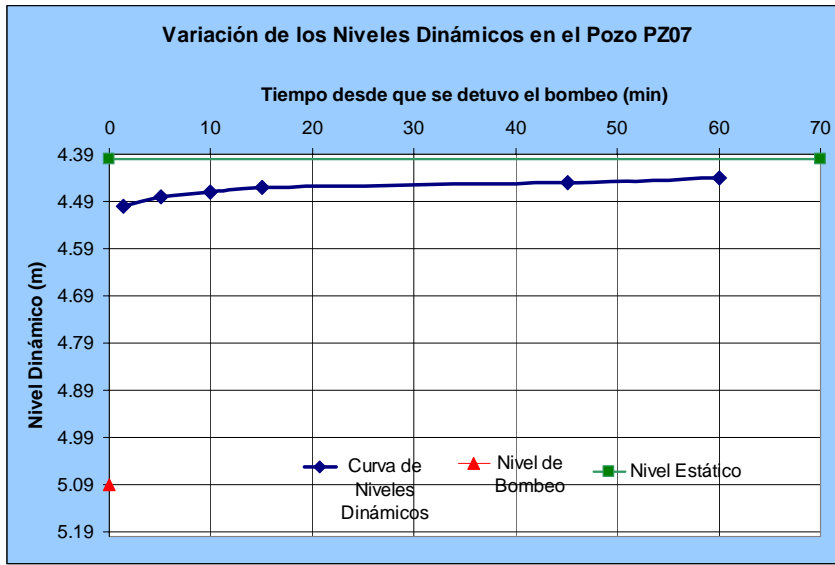


Figura 16.- Variación de los Niveles Dinámicos en la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ07, Macuto Edo. Vargas.

En la figura 16 se observa que los niveles dinámicos que corresponden al nivel observado en el pozo durante el proceso de bombeo, decrecen a medida que transcurre el tiempo de bombeo.

En la prueba no se logró alcanzar el equilibrio debido a las limitaciones establecidas por el propietario del pozo en cuanto a que el tiempo de apagado de la bomba era máximo de 1 hora, no obstante para ese tiempo, se pudo recuperar un 94 % del nivel total abatido por la bomba es decir 65 de los 69 cm.

10.1.1.1 Cálculo del valor de la Transmisividad (T) mediante los datos de abatimientos residuales.

Para el cálculo del valor de la transmisividad se utilizó la fórmula de aproximación logarítmica (4) mejor conocida como la fórmula de recuperación de Theis y L.K. Wensel:

$$s_r = \frac{0.1832Q}{T} \log\left(\frac{t}{t'}\right) \dots\dots\dots (4)$$

De donde;

s_r : Descenso residual = nivel dinámico – nivel estático

t : Tiempo al inicio de la prueba de bombeo

T : Transmisividad

Q : Caudal de Bombeo

t' : Tiempo desde el instante en que se detuvo el bombeo

Considerando un ciclo logarítmico en la ecuación (4) se obtiene de la pendiente:

$$T = \frac{0.1832Q}{\Delta s_r} \dots\dots\dots (5)$$

que al usar unidades consistentes resulta:

$$T(m^2 / día) = 15,814 \frac{Q(lts / s)}{\Delta s_r(m)} \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

Δs_r = variación del abatimiento residual por cada ciclo logarítmico de la relación t/t' .

Los descensos residuales s_r (Tabla 4, columna 5) y la relación de tiempos t/t' (Tabla 4, columna 3) se representaron para obtener la figura 17. Los valores de s_r se colocaron en escala aritmética (eje Y) y los de (t/t') en escala logarítmica (eje X).

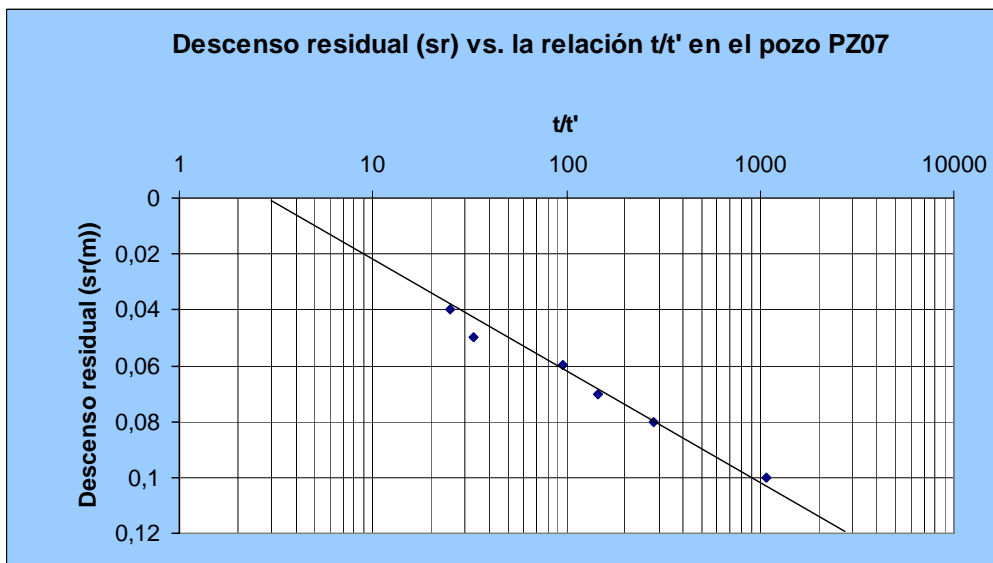


Figura 17.- Representación en escala semilogarítmica de la relación Descenso residual vs. t/t' en la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ07

En la figura 17 la pendiente de la recta $\Delta s_r = 0,040$ m y aplicando la ecuación

(6) tenemos que:
$$T = 15,814 \frac{2,3lps}{0,040m} = 910 \text{ m}^2/\text{día}$$

Para un tiempo de bombeo de 1 día se obtiene una Transmisividad de 910 m²/día, puesto que este valor es mayor a 124 m²/día se concluye que el material corresponde a una formación explotable económicamente para cualquier pozo industrial, municipal o de irrigación, no obstante se recomienda que los valores tanto para el caudal de bombeo como el de la duración de la prueba sean de mayor amplitud, esto con la finalidad de obtener un valor representativo de transmisividad del material.

Con respecto a la figura 17 la recta de mejor ajuste debe pasar teóricamente por $s_r = 0$, para $t/t' = 1$ es decir por el origen, en realidad no siempre pasa por ese punto y cuando así ocurre, se dice que las condiciones del acuífero no son las ideales, en el caso de la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ07 cuando el descenso residual es cero, la recta pasa por un punto mayor que 1, lo que se atribuye a que el acuífero recibió recarga durante el bombeo y recupera su nivel de equilibrio en un corto tiempo, esto es antes de que $(t/t') = 1$.

10.1.1.2 Cálculo del coeficiente de permeabilidad (K)

Una vez determinada la transmisividad y de acuerdo a la ecuación (7) se obtiene el valor de la permeabilidad:

$$K(m/día) = \frac{T(m^2/día)}{e(m)} \dots\dots\dots (7)$$

De donde;

e= espesor saturado del acuífero

En el caso del pozo PZ07 el espesor saturado adoptado en ese punto es de 32 m, puesto que es el valor de la profundidad máxima perforada en dicho pozo, posteriormente aplicando la ecuación (7) se obtiene que:

$$K = \frac{910(m^2/día)}{32m} = 28 \text{ m/día}$$

10.1.2 Segunda prueba de recuperación

Tabla 5. Datos obtenidos de la prueba de recuperación en el pozo PZ06 realizada el 21/10/07

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Tiempo al Inicio de la prueba (t (min))	Tiempo desde que se detuvo el bombeo (t'(min))	(t / t')	Nivel Dinámico (m)	Descenso residual (m) S _r	Recuperación (m) S _R
181,12	1,12	161,71	4,87	0,06	1,52
205,50	25,50	8,06	4,86	0,05	1,53
206,25	26,25	7,86	4,835	0,02	1,56
208,72	28,72	7,27	4,830	0,02	1,56
212,47	32,47	6,54	4,826	0,01	1,56
239,10	59,10	4,05	4,82	0,01	1,57

En esta prueba de recuperación realizada en el pozo PZ06 el caudal de bombeo fue de $Q_b=5,04$ lps, el radio del pozo $r_w=0.0762$ m (3''), Nivel estático= 4,81 m, Nivel Final de bombeo= 6,39 m.

A continuación en la figura 18, se observa la variación de los niveles dinámicos una vez cesado el bombeo.

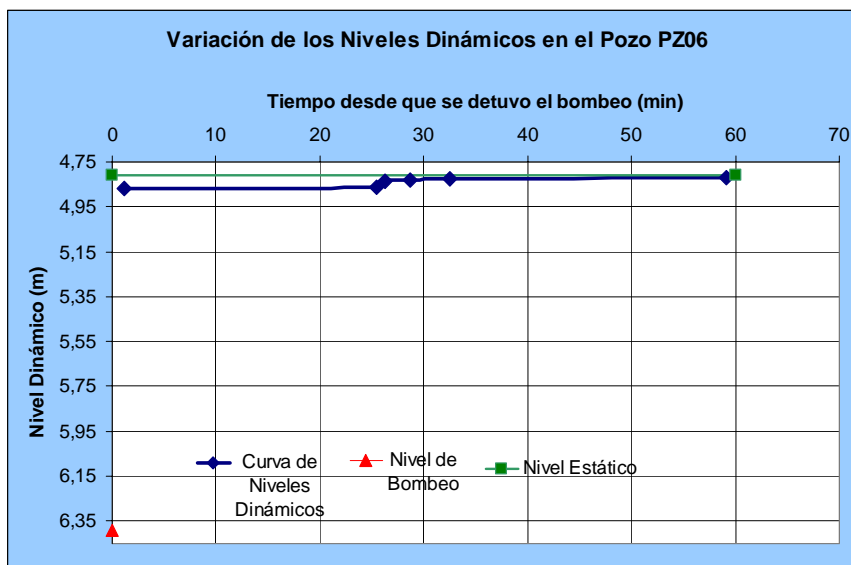


Figura 18.- Variación de los Niveles Dinámicos en la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ06, Macuto Edo. Vargas

De acuerdo a la figura 18 se observa que el tiempo de recuperación del pozo PZ06 es pequeño, es decir el 96 % del nivel abatido por la bomba es recuperado en tan solo en 1,12 minutos (1,52 de 1,58m)

10.1.2.1 Cálculo del valor de la Transmisividad (T) mediante el uso de los datos de abatimientos residuales.

Los descensos residuales s_r (Tabla 5, columna 5) y la relación de tiempos t/t' (Tabla 5, columna 3) se representaron para obtener la figura 19.

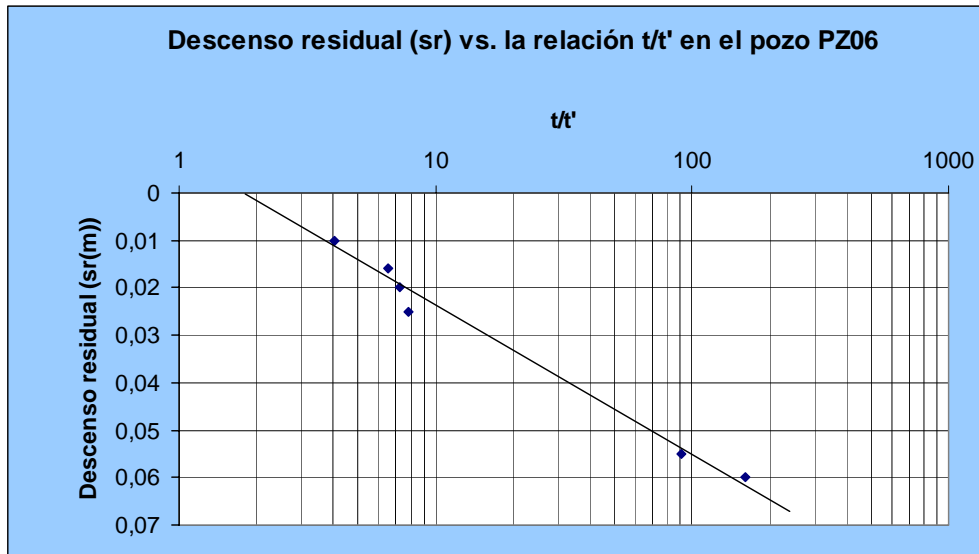


Figura 19.- Representación en escala semilogarítmica de la relación Descenso residual vs. t/t' en la prueba de recuperación realizada en el pozo PZ06

En la figura 19 la pendiente de la recta $\Delta s_r = 0,032$ m y aplicando la ecuación (6) tenemos que:

$$T = 15,814 \frac{5,04 \text{ lps}}{0,032 \text{ m}} = 2490 \text{ m}^2/\text{día}$$

Con un tiempo de bombeo de 3 horas, la transmisividad calculada fue de 2490 m²/día. (más elevada que en la prueba anterior), lo que implica que sigue siendo una formación explotable económicamente. En la figura 19 el descenso residual corta al eje de la abscisas en un punto mayor que 1, lo cual se atribuye a que el acuífero recibió recarga durante el bombeo y recupera su nivel de equilibrio en un corto tiempo.

10.1.2.2 Cálculo del coeficiente de permeabilidad (K)

En el caso del pozo PZ06 el espesor saturado adoptado en ese punto es de 24 m, al igual que en el pozo PZ07, es el valor de la profundidad máxima perforada en dicho pozo y aplicando la ecuación (7) se obtiene que:

$$K = \frac{2490(m^2 / día)}{24m} = 104 \text{ m/día}$$

10.2 Determinación de la permeabilidad para el material recolectado en el vaso del embalse Macuto mediante método de laboratorio

Para la determinación de la permeabilidad de las muestras en el laboratorio se utilizan los permeámetros, los cuales pueden ser de carga fija, los permeámetros de carga variable y los diferenciales, estos instrumentos permiten medir la cantidad de flujo que fluye a través de un material permeable cuando se somete a una carga hidráulica, un diagrama esquemático del mismo se ilustra en la figura 20. En este caso fue empleado un permeámetro de carga variable, el cual utiliza la caída de la presión hidrostática, dentro de un tubo que actúa como manómetro. El agua se vierte por la columna alta de área transversal a , pasa a través de la muestra saturada de área transversal A y se observa una altura inicial cualquiera, h_1 , en el manómetro para un tiempo t_1 . Después de un tiempo t_2 se tendrá en el manómetro otra lectura de altura h_2 , la cual será menor que la primera pues habrá transcurrido un tiempo $\Delta t = t_2 - t_1$.

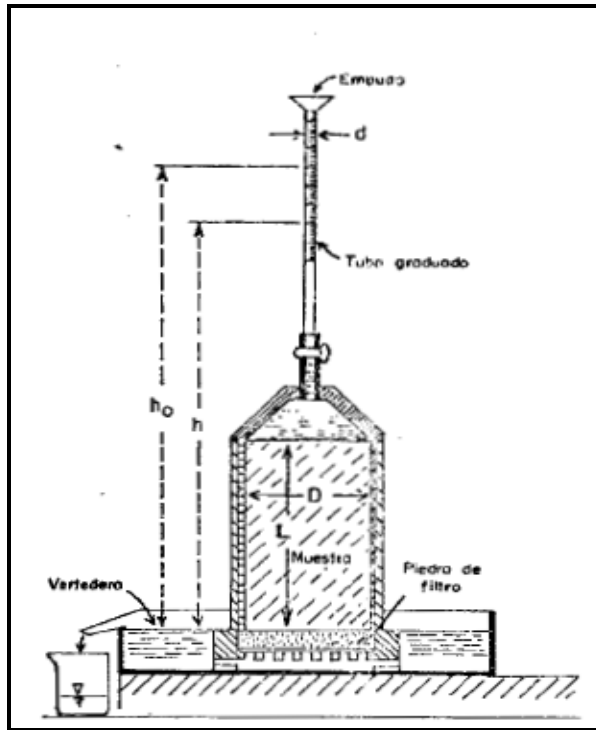


Figura 20. Estructura de un permeámetro de carga variable.

De la Ley de Darcy expresada mediante la ecuación $Q = K \times I \times A$ (8)

se despeja el volumen V en forma diferencial:

$$Q = \frac{dV}{dt} = K \times I \times A \text{ (9)}$$

$$dV = K \frac{h}{L} A dt \text{ (10)}$$

Si a es la sección transversal del tubo manométrico, el volumen de agua que desciende desde la altura h_1 a la h_2 será:

$$V = -a \times (h_1 - h_2) \text{ (11)}$$

Y en forma diferencial:

$$dV = -adh \text{ (12)}$$

El signo negativo indica que la altura de elevación disminuye con respecto al tiempo -t-. Si la expresión (12) se compara con la ecuación (10) se tiene que:

$$-adh = K \frac{h}{L} A dt \text{ (13)}$$

Como las expresiones de áreas son:

$$a = \pi \times r^2 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \pi \times R^2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

Se sustituyen:

$$-\frac{\pi d^2}{4} dh = K \frac{h \pi D^2}{L} dt \dots\dots\dots (14)$$

Simplificando se tiene que:

$$-d^2 dh = \frac{KhD^2}{L} dt \dots\dots\dots (15)$$

Reagrupando:

$$-\frac{dh}{h} = \frac{KD^2}{d^2 L} dt \dots\dots\dots (16)$$

Integrando para los límites señalados se tiene que:

$$-\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = K \frac{D^2}{d^2 L} \int_{t_1}^{t_2} dt \dots\dots\dots (17)$$

Resolviendo:

$$-(Ln h_2 - Ln h_1) = K \frac{D^2}{d^2 L} (t_2 - t_1) + c \dots\dots\dots (18)$$

Para $\Delta t=0$ se tiene que $h_1 = h_2$ y por lo tanto $c = 0$

$$Ln \frac{h_1}{h_2} = K \frac{D^2 \Delta t}{d^2 L} \dots\dots\dots (19)$$

Donde $\Delta t = t_2 - t_1$

Despejando K :

$$K = \frac{aL}{A\Delta t} Ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{aL}{A\Delta t} 2.3 \log \frac{h_1}{h_2} \dots\dots\dots (20)$$

Aplicando los principios antes señalados al ensayo realizado en el laboratorio bajo las condiciones de diseño (Figura 20) observadas en el permeámetro: $d=1,8$ cm, $a=2,54$ cm², $D=10,2$ cm, $A=81,71$ cm², $h_0=150$ cm, $L=59,8$ cm.

Tabla 6. Resultados obtenidos en los tres ensayos con el permeámetro de carga variable.

	Primer ensayo	Segundo ensayo	Tercer ensayo
h (cm)	t (seg)	t (seg)	t (seg)
h1=150	0,00	0,00	0,00
h2=130	9,94	10,37	10,54
h3=110	22,73	24,34	24,20
h4=90	40,31	42,08	42,36
h5=70	64,00	66,00	66,00

En el cuadro anterior se muestran los resultados experimentales obtenidos mediante tres ensayos, confirmándose una buena consistencia en los mismos. Para efectos de cálculos, se emplearon los datos correspondientes al tercer ensayo. Los valores obtenidos para el mismo, se ilustran en la figura 21.

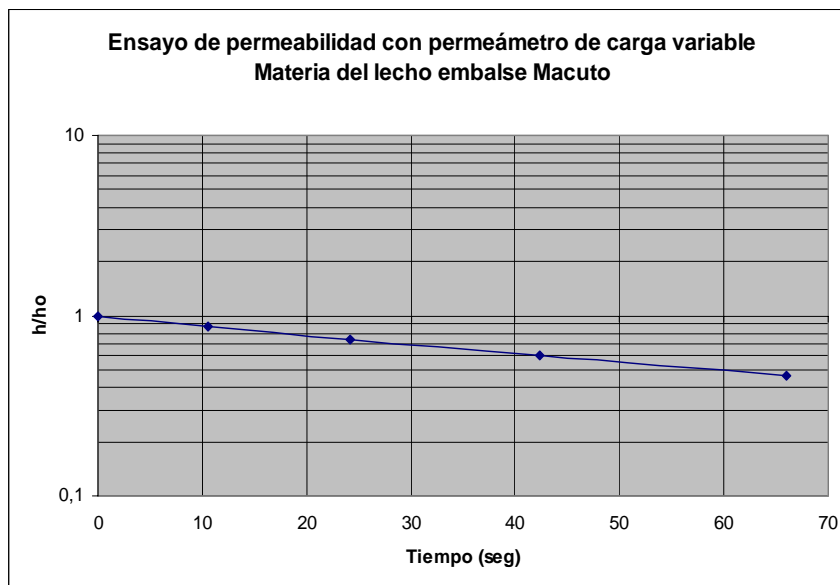


Figura 21. Variación relativa de las alturas manométricas en función del tiempo. Ensayo de permeabilidad para el material recolectado en el vaso del embalse Macuto

Aplicando la ecuación (20) se tiene que:

$$K = \frac{2,54cm^2 59,8cm}{81,71cm^2 (10,54 - 0)seg} 2.3 \log \frac{150cm}{130cm} = \frac{151,89cm^3}{861,22cm^2 seg} 2.3 \log 1,15$$

$$K = 0,18 \frac{cm}{seg} \times 0,14 = 0,0252 \frac{cm}{seg} = 21,77 \frac{m}{día}$$

$$K = 0,0252 \frac{cm}{seg} = 21,77 \frac{m}{día} = 22 \frac{m}{día}$$

10.3 Análisis de las permeabilidades obtenidas

La permeabilidad obtenida en la muestra recolectada en el ápice del cono mediante métodos de laboratorio (permeámetro de carga variable) es de 22 m/día, y a través del método de campo (ensayo de recuperación) para el material del pozo PZ06 y PZ07 son respectivamente 104 m/día y 28 m/día.

En todo caso el valor de la permeabilidad obtenida mediante el método de laboratorio se considera como el valor más representativo del material en el acuífero, debido a las diversas limitaciones que se produjeron en la realización de los ensayos de recuperación tanto para el pozo PZ06 y el PZ07.

11. BALANCE HÍDRICO

Para el cálculo del balance hídrico se utilizó la información proveniente de las estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio, tanto para la parte baja como la alta de la cuenca del Río San José de Galipán, logrando con esto determinar los meses en que la formación geológica se recarga por acción de la infiltración vertical de la lluvia. Luego aplicando la clasificación climática de THORNTHWAITE (1948), y utilizando una capacidad de almacenamiento del suelo de 80 mm (Vidal Sáez), se determinó el tipo de clima y el balance hídrico de ambos sectores (parte alta y baja de la cuenca).

11.1 Parte baja de la cuenca del río San José de Galipán

Las estaciones cercanas al área de estudio son; la estación Maiquetía-Aeropuerto de tipo climatológica (10°36' N y 66° 59' W, 43 m.s.n.m) con un período de registro de 40 años (1951-1990) y la estación Macuto de tipo pluviométrica (10° 36' 01'' N y 66° 53' 47 '' W, 43 m.s.n.m) cuyo período de registro es de 49 años (1951-1999), de la primera se utilizaron los datos de temperatura media mensual (°C) y de la segunda los de precipitación media mensual (mm). A continuación en la tabla 7 se representan los valores obtenidos en el balance hídrico.

Tabla 7. Balance hídrico parte baja de la cuenca del Río San José de Galipán (Estación Macuto)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
T (°C)	24.5	24.5	24.9	25.7	26.6	26.7	26.4	27.1	27.5	27.3	26.6	25.4	
PP (mm)	45.9	24.1	18.5	38.1	37.1	50.6	62	65.3	49.1	61.5	84.6	83.6	620.5
ETP (mm)	129.1	120.4	144.6	110.8	113.0	97.6	102.9	110.7	110.0	113.8	109.1	109.9	1371.9
Alm (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ETR (mm)	45.9	24.1	18.5	38.1	37.1	50.6	62	65.3	49.1	61.5	84.6	83.6	620.4
Def (mm)	83.2	96.3	126.1	72.7	75.9	47.0	40.9	45.4	60.9	52.3	24.5	26.3	751.5
Exc (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

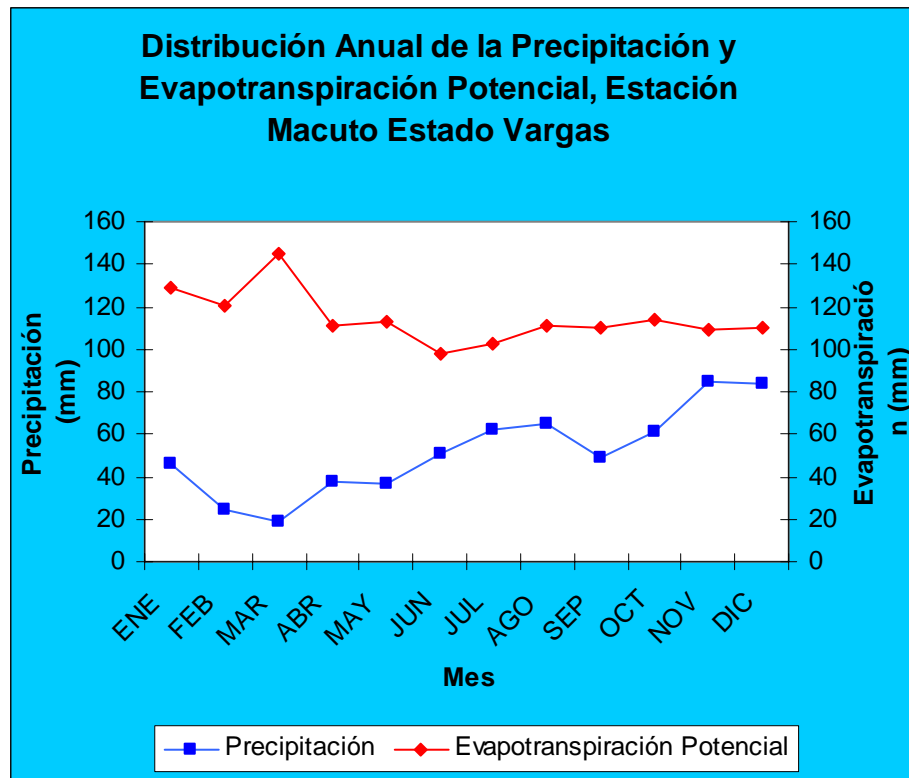


Figura 22.- Variación de la precipitación media mensual y evapotranspiración potencial, Estación Macuto Edo. Vargas

En la figura 22, se observa que la curva de evapotranspiración potencial está por encima de la precipitación media mensual, esto implica que la recarga natural del acuífero debido a la lluvia no es considerable en este sector.

Aplicando el sistema de clasificación se tiene que el sector de Macuto es de tipo semiárido con un nulo o pequeño exceso de agua (Dd) y puesto que en esa zona la evapotranspiración potencial total anual es mayor a 1140 mm el tipo de región térmica es megatérmica o cálida (A').

11.2 Parte alta de la cuenca del río San José de Galipán

En esta zona se tiene la data de un conjunto de estaciones pluviométricas entre estas; San Francisco, Picacho y Caracas- Hotel Humboldt (10°32'40'' N y 66°52'54'' W, 2129 m.s.n.m), las dos primeras instaladas en el año 2004, es decir un corto período de registro (3 años), mientras que en la de Humboldt, el período registrado es de 20 años (1958-2002).

Utilizando los datos de la estación Humboldt se determinó el balance hídrico en la parte alta de de la cuenca del Río San José de Galipán, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Balance hídrico parte alta de la cuenca del Río San José de Galipán (Estación Caracas- Humboldt)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
T (°C)	17.4	17.4	18.7	14.7	13.9	14.1	13.9	15	17.5	16.2	18.4	17.8	
PP (mm)	26	13.7	32.1	47.7	65.4	80.2	114	116	114.4	115.6	96.9	51.5	873.2
ETP (mm)	67.7	67.7	76.2	51.5	47.0	48.1	47.0	53.2	68.4	60.3	74.2	70.3	731.5
Alm (mm)	19.5	0	0	0	18.4	50.5	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	61.2	
ETR (mm)	67.7	33.2	32.1	47.7	47	48.1	47	53.2	68.4	60.3	74.2	70.3	649.2
Def (mm)	0.0	34.6	44.1	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.4
Exc (mm)	0	0	0	0	0	0	37.8	62.3	46.0	55.3	22.7	0	224.1

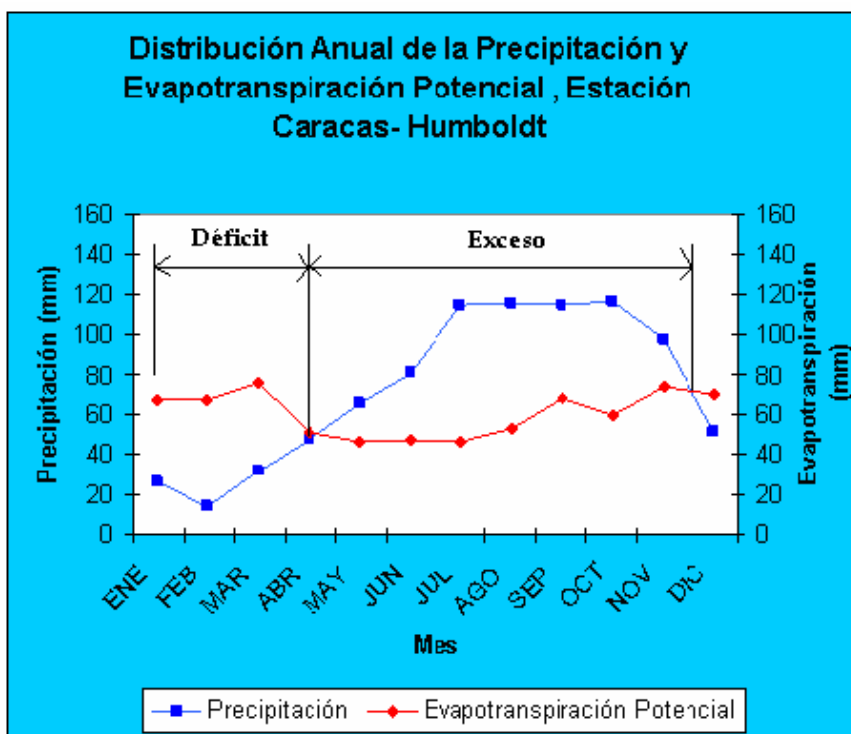


Figura 23.- Variación de la precipitación media mensual y evapotranspiración potencial, Estación Caracas-Humboldt

Aplicando el sistema de clasificación (THORNTHWAITE) se tiene que la parte alta de la cuenca del Río San José de Galipán (Humboldt) es de tipo ligeramente húmedo cuya época seca es nula o con pequeños déficit (B_{1r}), la región térmica es mesotérmica-templada fría (B'_2).

En la figura 23, se observa deficiencia de agua entre los meses de diciembre y abril, lo cual es consecuencia del agotamiento del agua almacenada en el subsuelo indicando que estos son los meses críticos para la explotación del acuífero. Sin embargo, para el mes de mayo se observa el comienzo de la restitución del agua al suelo (recarga natural del acuífero) hasta el mes de noviembre, considerándose este el período de mayor aporte de agua al subsuelo.

12. ALMACENAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CONO DE MACUTO

Las reservas de aguas subterráneas representan el volumen de agua almacenada en los acuíferos en el curso de un período determinado, o en un instante dado. Dependen de la porosidad, el volumen del depósito y el espesor saturado del acuífero. Por tanto, para determinar el volumen de agua almacenada es necesario conocer el valor de la porosidad correspondiente a los materiales que se encuentran en el área y el espesor total de acuífero, el cual es la suma de los espesores de las capas permeables.

Se pueden distinguir tres tipos de reservas, reguladoras, permanentes y reservas totales (CASTANY, 1975). Las reservas reguladoras corresponden al volumen de agua libre almacenado en la sección de capa acuífera limitada por los niveles piezométricos extremos, mínimo y máximo, de la superficie piezométrica en el curso del período considerado: un año hidrológico determinado o el año hidrológico medio (5 a 10 años por lo menos), estas reservas van ligadas a las fluctuaciones de la superficie piezométrica, alimentan y regulan el caudal de flujo de las aguas subterráneas en las surgencias naturales. Las reservas permanentes representan el volumen de agua libre almacenado en la capa acuífera, limitada en la base por el substrato impermeable y en el techo por la superficie piezométrica mínima, están poco o nada afectadas por las fluctuaciones de la superficie piezométrica, su volumen se considera constante y su régimen, solo está influenciado en largos períodos, a escala geológica para los mantos profundos; en cuanto a las reservas totales o también llamadas potenciales, representan el volumen de agua libre almacenada, en una fecha determinada, en la totalidad del acuífero, son iguales a la suma de las reservas reguladoras más las reservas permanentes.

12.1 Determinación de la porosidad (p).

Para la determinación del volumen de agua almacenado en el acuífero es necesario determinar previamente el valor de la porosidad. Lo anterior se realizó en el laboratorio tomando un volumen total (V_t) de la muestra captada en el campo. Previamente la muestra fue secada en una estufa a 101°C , luego se llevó a la campana de desecación con sales higroscópicas, para evitar absorción de humedad de la atmósfera durante la etapa de enfriamiento. Seguidamente, utilizando un beaker graduado se le fue agregando agua a la muestra hasta conseguir saturarla ($S=100\%$). Así se tiene que el volumen de agua necesario para saturar la muestra es igual al volumen de vacío. Los resultados detallados se describen a continuación.

Por definición, la porosidad $-p-$, se expresa de la forma:

$$p = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad \dots\dots\dots (21)$$

Donde:

V_v = volumen de vacío

V_t = volumen total de la muestra saturada = $V_s + V_v$

V_s = volumen sólido

La relación anterior se puede ilustrar mediante la siguiente figura:

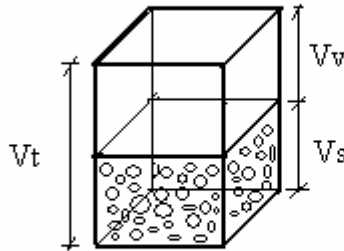


Figura 24.- Croquis ilustrativo de un volumen de material acuifero, mostrando la fase sólida y el espacio vacío.

Los resultados obtenidos en el laboratorio fueron los siguientes:

$$V_v = 90 \text{ cm}^3$$

$$V_t = 380 \text{ cm}^3$$

Sustituyendo los resultados anteriores en (21) se tiene que:

$$p = \frac{V_v}{V_t} \times 100 = \frac{90 \text{ cc}}{380 \text{ cc}} \times 100 = 24 \%$$

$$p = 24 \%$$

La porosidad obtenida corresponde a la muestra captada en el depósito de sedimentos almacenados en el vaso del embalse Macuto, y la misma se utilizará para determinar el volumen de agua almacenada en el cono, bajo la premisa de que la misma mantiene un valor similar en ambos sectores.

Se determinó el V_s , a través de las relaciones (21) y (22), y aplicando la expresión para el índice de vacío $-e-$, se tiene:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots\dots\dots (22)$$

Al dividir entonces la expresión (21) por (22) se obtiene:

$$\frac{p}{e} = \frac{V_s}{V_t} = \frac{V_t - V_v}{V_t} = 1 - \frac{V_v}{V_t} = 1 - p \dots\dots\dots (23)$$

De donde:

$$e = \frac{p}{1-p} \dots\dots\dots (24)$$

Considerando las expresiones (22) y (24), resulta:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{p}{1-p} \dots\dots\dots (25)$$

Se tiene para V_s :

$$V_s = \frac{V_v}{e} = \frac{V_v \times (1-p)}{p} \dots\dots\dots (26)$$

Finalmente, sustituyendo en (26) los valores conocidos se obtiene:

$$V_s = \frac{90 \times (1-0.24)}{0.24} = 285 \text{ cm}^3$$

$$\boxed{V_s = 285 \text{ cm}^3}$$

Adicionalmente, se determinó para la muestra de campo su contenido de humedad -C- utilizando la expresión:

$$C = \frac{W_t - W_s}{W_s} \times 100 = \left(\frac{748.66 - 743.80}{743.80} \right) \times 100 = 0.63 \% \dots\dots\dots (27)$$

$C = 0.63 \%$

El resultado anterior indica que la muestra presentaba un bajo contenido de humedad, lo cual es explicable por encontrarse a nivel superficial, bajo temperaturas ambientales elevadas y en contacto con la atmósfera.

Los resultados obtenidos corresponden a una muestra superficial acumulada en condiciones y en un ambiente diferente al que se podría encontrar en el depósito de relleno del cuerpo principal del cono. Sin embargo, se estima que los valores obtenidos para la porosidad, índice de vacío y las propiedades granulométricas, podrían diferir poco de las existentes en la estructura interna del mismo.

12.2 Zonas de humedad

Admitiendo que el depósito aluvial del cono es homogéneo se pueden identificar diferentes zonas de humedad, lo que permite diferenciar los diferentes tipos de aguas en el acuífero. Se asume que el agua al infiltrarse continúa hasta la capa impermeable y satura el medio de abajo hacia arriba, hasta alcanzar una cierta elevación que constituye la zona freática. (Figura 25).

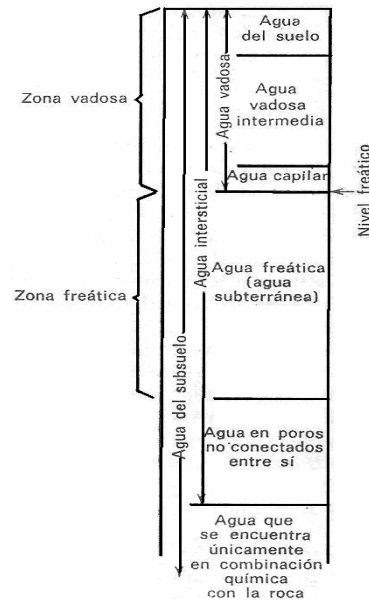


Figura 25.- Distribución del agua debajo del subsuelo. Clasificación propuesta por Davis (1971).

En la figura anterior, se puede observar la zona freática, ésta es el dominio del agua subterránea que alimenta a los pozos y a las fuentes, limita en su parte inferior con una zona donde la compacidad del terreno, hace que éste contenga muy pocos poros no conectados entre sí, por lo que el agua no puede emigrar en profundidad, no se mueve ni se transpira. La profundidad de este sustrato compacto varía con el medio geológico. A profundidades superiores a los 30.000 m el calor y la presión tan elevada no permiten la existencia de espacios porosos, ni la existencia de agua libre; a

estas profundidades, el agua sólo puede existir en forma de combinación química con otras sustancias.

En cuanto a la zona intermedia, se tiene que ésta separa la superficie superior de la zona de saturación de la zona de humedad del suelo. Al agua del suelo y a la de la zona intermedia se le llama zona vadosa, estas aguas únicamente se desplazan por acción de la fuerza de gravedad. La zona vadosa en el cono de Macuto debe presentar pérdidas elevadas como resultado de la transmisividad alta y de los intersticios del material, así como por las condiciones térmicas ambientales durante todo el año.

Por otra parte, si el material de la zona intermedia es isotrópico y existe además una importante recarga de agua, su contenido de humedad estará generalmente comprendido entre un nivel próximo a la saturación y otro próximo al índice de retención específica del material. No obstante, el terreno natural no suele ser homogéneo, por lo que la recarga se verifica de manera desigual de una zona a otra.

En cuanto a la franja capilar, se caracteriza por ser irregular y su posición varía constantemente al variar el nivel freático y el caudal de la recarga. La parte superior de la franja capilar contiene numerosas bolsas de aire que pueden representar una resistencia al movimiento descendente del agua. Para el cono de Macuto, debido a la granulometría mayor presentada, la altura capilar debe esperarse resulte inferior a la que se puede encontrar en sedimentos de granulometría más fina.

12.3 Volumen de agua almacenado en el acuífero

Para determinar el volumen de agua almacenado en el cono así como las reservas, es necesario conocer las características geométricas del reservorio: espesores, áreas, la posición del nivel freático y sus fluctuaciones estacionales. Algunas de estas propiedades se han obtenido de los pozos perforados en el cono de Macuto y de la información topográfica existente. En este sentido, existen limitaciones, dado que no se cuenta con un número suficiente de pozos y las profundidades alcanzadas no superan los 30 m. Esta información podría posteriormente confirmarse mediante exploraciones geofísicas.

Si se establece que:

A.Z.F. = almacenamiento de agua en la zona freática

V_E = volumen de espesor saturado

p = porosidad

A_{cono} = área del cono

E = espesor saturado

Se tiene:

$$A.Z.F. = V_E \times p \dots\dots\dots (28)$$

Sabiendo que:

$$V_E = A_{cono} \times E \dots\dots\dots (29)$$

Sustituyendo (29) en (28):

$$A.Z.F. = A_{cono} \times E \times p \dots\dots\dots (30)$$

Sustituyendo en (30) los valores correspondientes se tiene que:

$$A.Z.F. = (230000 \text{ m}^2 * 30 \text{ m} * 0,24) = 1.656.000 \text{ m}^3$$

Ahora bien, para determinar el volumen de agua máxima que se puede almacenar en el acuífero, se debe calcular el volumen de agua necesaria (V_w) para saturar el volumen total de sedimentos acumulados en el cono de Macuto (V_t), ya que si en una situación ideal todo el primer volumen mencionado se llegara a infiltrar formaría parte de las reservas permanentes.

Partiendo de la relación $p = \frac{V_w}{V_t} \times 100$ en donde:

$$p = 24\%$$

V_t = volumen total de sedimentos en el cono de Macuto = $8,21 \times 10^5 \text{ m}^3$
 (Tagliaferro y Bukor, 2004)

Se tiene que:

$$V_w = \frac{V_t \times p}{100} = \frac{(8.21 \times 10^5 \text{ m}^3 \times 24)}{100} = 197040 \text{ m}^3$$

$$\boxed{V_w = 197.040 \text{ m}^3}$$

Por observaciones de los residentes de la zona, se comprobó que durante el evento de Vargas de diciembre de 1999, el nivel freático ascendió hasta la superficie del terreno, lo cual significa un incremento (ascenso) promedio de la zona saturada de 5,5 m, esto conduce a un volumen total de agua almacenada en el cono de 303.600 m^3 , valor calculado mediante la siguiente relación:

$$A.Z.V. = P_{\text{nivel-estático}} \times A_{\text{cono}} \times p \dots \dots \dots \quad (31)$$

Donde:

$A.Z.V.$ = almacenamiento de agua en la zona vadosa

$P_{\text{nivel-estático}}$ = profundidad promedio de los niveles estáticos

A_{cono} = área del cono

p = porosidad

Sustituyendo en (31) los valores correspondientes:

$$A.Z.V. = 5,5 \text{ m} \times 230000 \text{ m}^2 \times 0,24 = 303.600 \text{ m}^3$$

Aun cuando la recarga en el cono se ve reducida debido al revestimiento de concreto en las zonas urbanas del mismo, ésta puede ser significativa desde las zonas no revestidas o desde los sectores adyacentes al cono compuestos de rocas metamórficas fracturadas.

13. CALIDAD FÍSICO-QUIMICA DE LAS AGUAS

El movimiento relativamente lento del agua que percola a través del suelo le permite a ésta mantener un contacto prolongado y estrecho con los minerales que constituyen la corteza terrestre. Estos minerales son solubles en menor o mayor grado, de tal manera que el agua aumenta su contenido mineral conforme se desplaza, hasta alcanzar un equilibrio combinado de las sustancias en solución. La utilidad del agua para varios fines se ve afectada por su contenido de minerales disueltos. Si uno o más minerales exceden de la cantidad que puede tolerarse para determinado uso, se deberá aplicar al agua algún tipo de tratamiento que elimine el material indeseable y torne el agua apta para el propósito al que se le va a destinar.

La mayoría de las aguas subterráneas no contienen materia en suspensión y prácticamente están libres de bacterias. Por lo general es clara y sin olor.

Las características químicas y biológicas del agua determinan su utilidad para los usos industriales, agrícolas y domésticos. Mediante el estudio de la composición química de las aguas se pueden obtener indicaciones importantes acerca de la historia geológica de las rocas que la contienen, de su velocidad y dirección de flujo, así como sobre la eventual presencia de yacimientos minerales ocultos.

13.1 Características físicas y químicas generales del agua subterránea

Se describen las principales características físicas y químicas del agua subterránea, haciendo uso de los resultados arrojados de los análisis físico-químicos aplicados a muestras de agua, captadas en algunos pozos de la zona bajo estudio, los cuales a su vez se comparan con el agua superficial recolectada en el río Macuto a nivel de la presa.

Las muestras de agua captadas fueron sometidas al Análisis-Físico-Químico en el Laboratorio de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA) de la Facultad de Ingeniería-Universidad Central de Venezuela, los resultados obtenidos se registran en la tabla 9, donde en la columna (1) se señalan los componentes o características examinadas, en las columnas (2) a (5) se refieren los pozos en los cuales fueron recolectadas las muestras con sus correspondientes resultados a los análisis, mientras que en (6) se observan los resultados obtenidos para la muestra de agua superficial.

Tabla 9. Resultados de los análisis físico-químicos aplicados a las muestras de agua recolectadas

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Componente o característica	M-PZ01	M-PZ07	M-PZ03	M-PZ03	Río Macuto (presa)
Fecha de captación	03/07/2007	05/10/2007	05/10/2007	30/01/2007	05/10/2007
Propiedades físicas y agregadas					
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	536,00	1260,00	395,00	408,00	176,00
Color aparente (U.Pt-Co)	1,00	50,00	5,00	5,00	25,00
Color verdadero (U.Pt-Co)	1,00	10,00	<5	<5	10,00
Turbiedad (UNT)	0,10	60,00	1,50	1,00	20,00
Alcalinidad total (CaCO_3) (mg/L)	133,00	146,00	106,00	112,00	52,00
Alcalinidad Fenolftaleínica (CaCO_3) (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dureza total (CaCO_3) (mg/L)	206,00	196,00	121,00	121,00	61,00
Dureza carbonática (CaCO_3) (mg/L)	133,00	146,00	106,00	112,00	52,00
Dureza no carbonática (CaCO_3) (mg/L)	73,00	50,00	15,00	9,00	9,00
Minerales Disueltos Calculados (mg/L)	324,00	882,00	276,50	285,60	123,20
Metales					
Calcio (Ca) (mg/L)	59,90	45,00	35,00	35,00	15,00
Magnesio (Mg) (mg/L)	13,60	20,00	8,00	8,00	5,00
Hierro (Fe) (mg/L)	0,01	2,80	<0,01	<0,01	0,10
Manganeso (Mn) (mg/L)	0,06	0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sodio (Na) (mg/L)	25,90	210,00	36,00	40,00	9,00
Potasio (K) (mg/L)	3,00	4,00	2,20	2,50	2,00
Constituyentes inorgánicos					
Cloruro (Cl^-) (mg/L)	45,80	252,00	28,00	28,00	8,00
Sulfato (SO_4^{2-}) (mg/L)	62,20	154,00	49,00	51,00	14,00
Carbonatos (CO_3^{2-}) (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonatos (HCO_3^-) (mg/L)	163,00	178,12	129,32	136,64	63,44
pH	6,80	6,60	6,60	6,40	7,30
Nitrato (NO_3^-) (mg/L)	1,07	0,12	0,38	0,01	0,86
Nitrito (NO_2^-) (mg/L)	<0,002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

13.1.1 Características químicas

A continuación se hace una interpretación de los resultados de los análisis y de las más importantes propiedades y constituyentes de las aguas.

Total de sólidos disueltos (TSD): representa el material sólido en solución, esté ionizado o no. No incluye, sin embargo, este concepto, a los sedimentos en suspensión, a los coloides ni a los gases disueltos. Teóricamente, si todo el material sólido disuelto puede determinarse mediante análisis químicos, el total de los sólidos disueltos (TDS) sería la suma numérica de todos los constituyentes determinados. Comparando los valores obtenidos para los minerales disueltos, determinados mediante el análisis físico-químico para cada una de las muestras analizadas (Tabla 9), resulta que la muestra de agua superficial del río Macuto, es la que presenta menor concentración de minerales disueltos, seguida por M-PZ03 y M-PZ01, mientras que M-PZ07 cuenta con una alta concentración de estos minerales, lo cual se puede explicar debido a que el pozo de donde se obtuvo la referida muestra de agua es el que se encuentra más cercano a la costa, por lo que el agua para llegar a ese punto debió recorrer mayores distancias, aumentando su contenido mineral conforme se desplazaba. Esto podría también ser consecuencia de la probable interrelación entre las aguas subterráneas del cono y las aguas marinas. De los resultados obtenidos se puede verificar, que las aguas subterráneas correspondientes a la zona media y alta del cono, se caracterizan por presentar una mineralización baja, caso contrario ocurre con las aguas subterráneas de la zona baja.

Constituyentes principales de las aguas

Son aquellos, que de acuerdo a la clasificación de los sólidos disueltos en las aguas potables según su abundancia, presentan una concentración entre 1,0 y 1.000 mg/l. Estos son:

Calcio (Ca): se presenta un alto contenido de calcio en las muestras de agua analizadas. El agua del subsuelo, en contacto con rocas sedimentarias de origen

marino, obtiene la mayor parte de su contenido de calcio a partir de la disolución de la calcita, aragonito, dolomita, anhidrita y del yeso, a lo anterior se le puede añadir el calcio que se libera por efecto de la descomposición meteórica de los feldespatos, provenientes de la Asociación Metamórfica Ávila, la cual hace contacto en el ápice del cono de Macuto y también en la base del mismo.

Magnesio (Mg): las diferencias entre los contenidos de magnesio para las muestras analizadas no son muy significativas, sin embargo, se tiene que el mayor contenido de este elemento lo presenta M-PZ07, seguido por M-PZ01, M-PZ03 y M-S, observándose que hacia la zona costera aumenta la concentración del magnesio. Las fuentes de magnesio para estas aguas están asociadas a la presencia de bloques y material cálcico-magnésico de origen detrítico, embutido dentro del macizo del cono y de las rocas adyacentes al mismo. Se puede apreciar que para las muestras analizadas el magnesio se encuentra en menor concentración que el calcio, esta diferencia se debe probablemente a la menor solubilidad de la dolomía, así como a la mayor abundancia de calcio en la corteza terrestre.

Sodio (Na): la concentración de este elemento en la muestra M-PZ07 es considerablemente mayor al contenido registrado para las demás muestras. Lo anterior puede deberse al proceso de movilización, de los iones sodio del agua del mar, introduciéndose en el pozo en el cual fue recolectada la muestra M-P07, que como se ha referido desde un comienzo, se encuentra ubicado más próximo a la costa, y con una profundidad cercana a la posición de la interfase agua dulce-salada; por consiguiente, las concentraciones de sodio disminuirán hacia las zonas más alejadas de la zona costera.

Bicarbonato (HCO_3^{2-}): la mayoría de los iones bicarbonato de las aguas subterráneas deben su existencia al dióxido de carbono (CO_2) procedente de la atmósfera, de los minerales del suelo, a la disolución de las rocas carbonatadas y probablemente a partir del dióxido de carbono generado en la diagénesis de los compuestos orgánicos. A partir de los resultados obtenidos para las muestras de agua analizadas, se observa que éstas poseen concentraciones similares de bicarbonatos, siendo mayor el contenido hacia la costa, y menor para el agua superficial.

Sulfatos (SO_4^{2-}): realizan su ciclo principalmente a través de la atmósfera y de la disolución de los minerales sulfatados presentes en las rocas sedimentarias. Las rocas sedimentarias, principalmente las arcillas orgánicas, pueden proporcionar grandes cantidades de sulfato mediante la oxidación de la marcasita y de la pirita.

Se aprecia que las muestras de los pozos M-PZ01, M-PZ03 y M-PZ07 presentan concentraciones de sulfatos menores a 100 mg/l, lo cual puede esperarse en aguas subterráneas contenidas en los sedimentos derivados de rocas ígneas y/o metamórficas, en cuanto a la muestra de agua superficial, ésta posee el contenido más bajo de sulfato, debido a que las aguas superficiales están sometidas a reducción del referido ión. La muestra del pozo M-PZ07 es la que posee la mayor concentración de (SO_4^{2-}), caracterizándose por consiguiente como un agua sulfatada, que responde a fenómenos locales de mineralización, asociados a la presencia de sulfuros metálicos.

Cloruros (Cl): el origen principal de los cloruros que se encuentran en las aguas del subsuelo corresponde al cloruro emanado desde la corteza terrestre a la atmósfera y devuelto posteriormente a la tierra a través de las aguas de lluvia. A medida que las masas de aire emigran hacia el interior de los continentes, aumenta la concentración relativa de las partículas de polvo procedentes de la superficie de los continentes. Dado que estas partículas sólidas actúan siempre a modo de núcleos de condensación, se explica que a medida que nos alejamos de la costa disminuya la relación de iones cloruro con respecto a los restantes iones. Lo anterior se evidencia debido a que la muestra M-PZ07 correspondiente a un pozo cercano a la costa presenta un contenido de cloruro mayor al obtenido en las demás muestras, las cuales disminuyen su contenido de cloruro considerablemente a medida que se alejan de la costa. Sumado a lo anterior, el alto valor de Cl en la muestra M-PZ07, se justifica por el agua marina probablemente introducida en el pozo correspondiente. Así mismo, la presencia de micas existentes en la unidad Esquisto de Tacagua, -que como se mencionó en capítulo precedente de este trabajo- están en contacto con el cono de Macuto, puede producir aportes de cloruros a las aguas debido a las cantidades importantes de Cl que éstas originan por efecto de la meteorización química.

Constituyentes secundarios de las aguas

De acuerdo a la clasificación de los sólidos disueltos en las aguas potables según su abundancia, son aquellos constituyentes con concentraciones comprendidas entre 0,01 y 10,0 mg/l).

Hierro (Fe): se aprecia que las muestras de agua analizadas presentan un bajo contenido de hierro, casi inapreciable, lo cual se atribuye a que en la zona no se encuentran los principales grupos mineralógicos que pueden contener grandes cantidades de hierro como son la magnetita, pirita, anfíboles y granates.

Potasio (K): se aprecia que los contenidos de potasio presentes en las muestras analizadas son bajos (entre 3-4 mg/l) y por tanto sin diferencias considerables entre los valores registrados. Sin embargo, la mayor concentración se encuentra nuevamente hacia la zona costera. Los bajos contenidos de potasio presentes en las aguas subterráneas del cono se deben, en primer lugar, al hecho de que el potasio, cuando es liberado en los procesos de descomposición meteórica de los minerales, se introduce en la estructura de algunas arcillas y de ciertos minerales semejantes a los del grupo de las arcillas, donde queda fijado; en segundo lugar, se debe al hecho de la mayor estabilidad que presentan minerales potásicos frente a los fenómenos de descomposición meteórica de los compuestos de sodio.

Carbonatos (CO_3^{2-}): la disociación de ion bicarbonato a carbonato comienza a tener realmente efecto a partir de un valor de pH superior a 8,2; por debajo de ese valor de pH, la mayoría de los iones carbonato se unen al hidrógeno para dar lugar a los iones bicarbonato. Debido a lo anterior se tiene que el contenido de carbonatos es igual a 0 mg/l para todas las muestras analizadas, ya que el pH para cada una de ellas resultó ser inferior al requerido para que se manifieste el ión en cuestión.

Nitratos (NO_3^-): la mayor parte del ión nitrato presente en las aguas naturales tiene un origen orgánico o procede de elementos químicos de origen agrícola o industrial. Los valores altos de nitratos en las aguas subterráneas se presentan cuando éstas atraviesan zonas donde se utilizan en abundancia los abonos nitrogenados o zonas donde existen acumulaciones de estiércol y demás desechos orgánicos animales, lo

anterior no es el caso de las muestras de aguas analizadas, ya que las mismas presentan valores muy bajos de este ión y de poca variabilidad.

Las concentraciones de los iones principales y secundarios antes descritos, se pueden visualizar de forma rápida mediante diagramas de Stabler, expresando las concentraciones en término de cantidades en reacción en %.

Para elaborar los diagramas de Stabler, se transformaron las concentraciones de los iones expresadas en mg/l, a cantidades en reacción (miliequivalentes por litro (meq/l)), llevando a una gráfica los radicales en ordenadas y las cantidades en reacción por cien en las abscisas.

Para las muestras de agua analizadas se tienen los siguientes gráficos de composiciones iónicas:

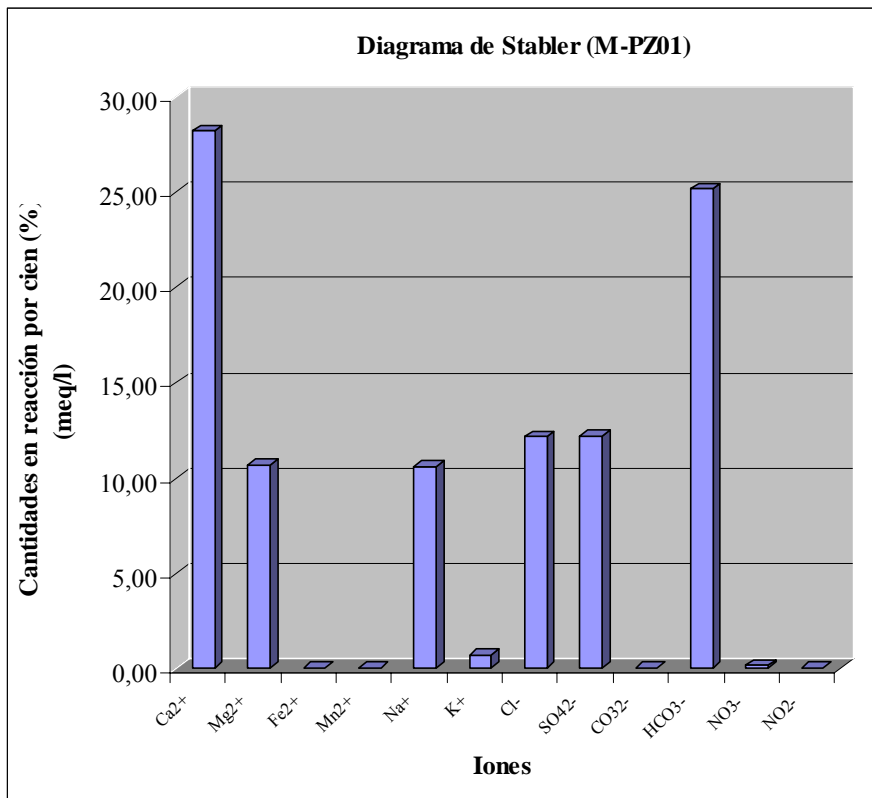


Figura 26.- Diagrama de Stabler para la muestra M-PZ01

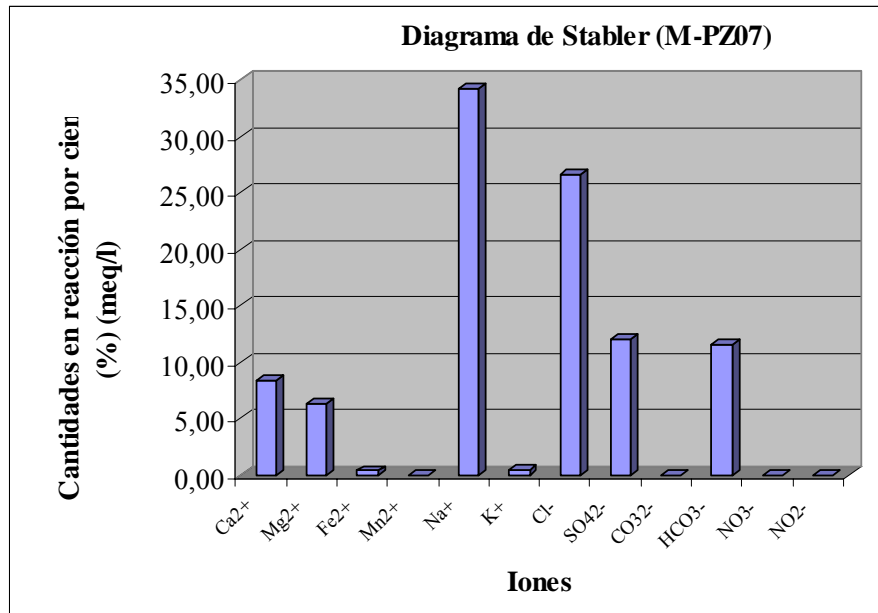


Figura 27.- Diagrama de Stabler para la muestra M-PZ07

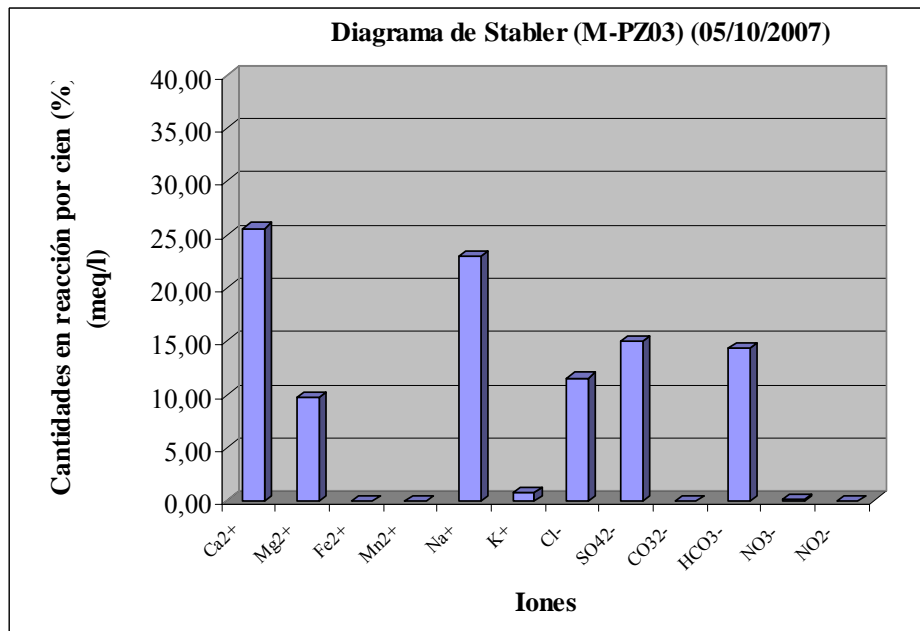


Figura 28.- Diagrama de Stabler para la muestra M-PZ03. Captada el día 05/10/2007.

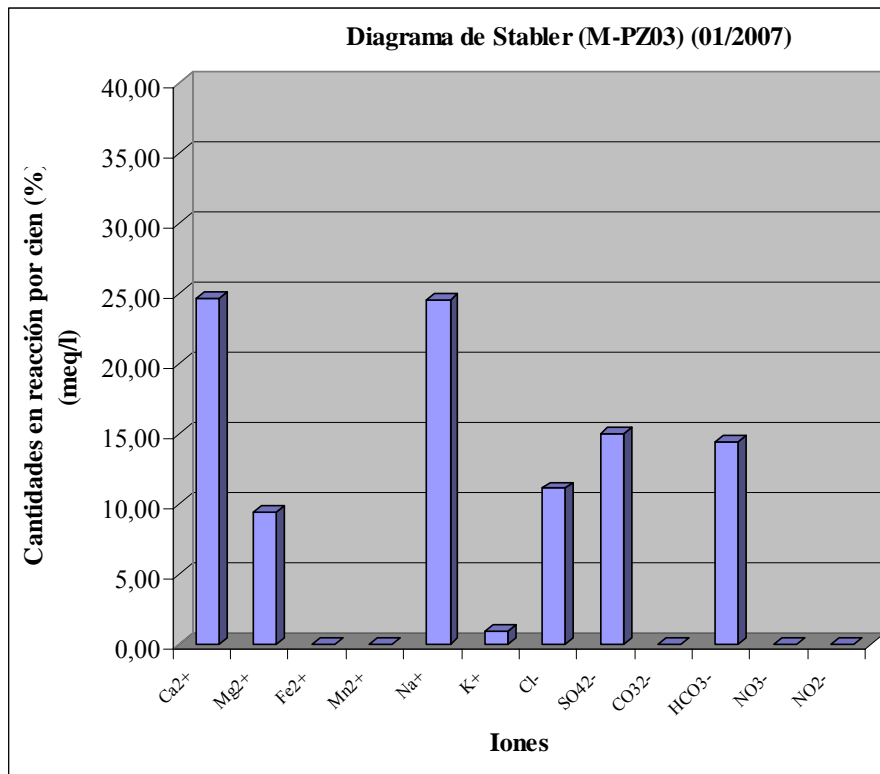


Figura 29.- Diagrama de Stabler para la muestra M-PZ03. Captada el 01/2007

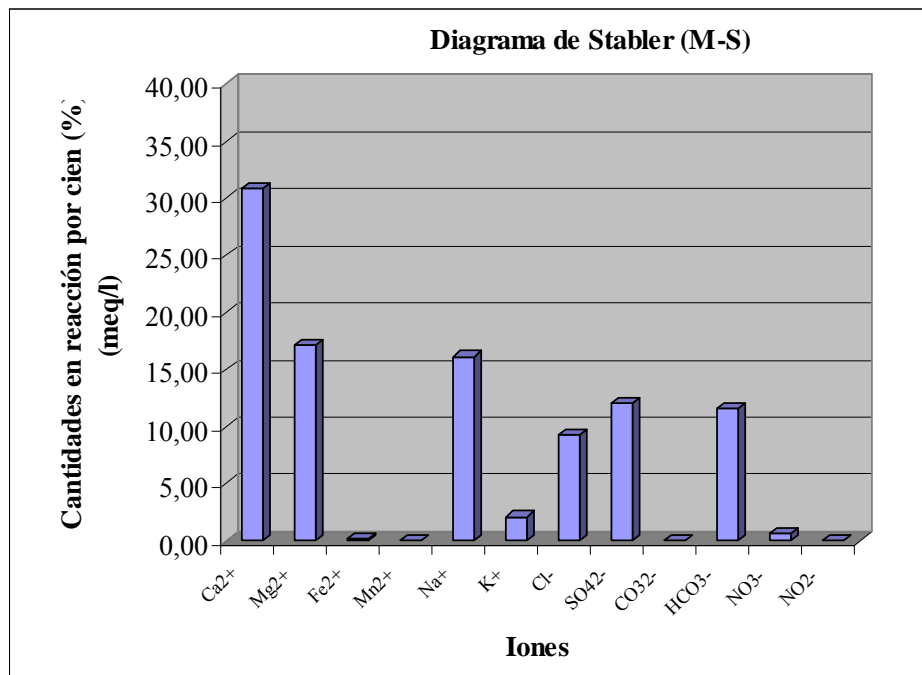


Figura 30.- Diagrama de Stabler para la muestra de agua superficial.

De las descripciones señaladas en este apartado, se determina que las muestras de agua subterránea recolectadas de algunos pozos de la zona presentan, en cuanto a sus características químicas, el siguiente comportamiento: los iones Mg^{+2} , Fe^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- , aumentan sus concentraciones a medida que las aguas se aproximan a la costa, dicho aumento se atribuye al hecho que las aguas para llegar al referido sector deben recorrer mayores distancias a partir de la zona donde se efectúa la recarga, produciendo que las aguas permanezcan un mayor tiempo de residencia en contacto con los materiales que las contienen, provocando así una mayor disolución de los materiales constituyentes del acuífero y rocas en contacto, con un consecuente aumento del contenido mineralógico, sumado a lo anterior, el aumento puede ser también ocasionado por fenómenos locales tales como intrusión salina debido a que el pozo que registró los mayores contenidos de los mencionados iones, como se mencionó anteriormente, presenta una profundidad cercana a la posición de la interfase de agua dulce-salina.

En cuanto al análisis de las muestras de agua recolectadas en el pozo PZ03 para el mes de enero y el 15 de octubre del año 2007, se tiene que la mayoría de las propiedades físicas y químicas determinadas se mantienen constantes, sólo unas pocas modificaron su valor y en muy bajo grado. De lo anterior se puede deducir que las propiedades se han mantenido constantes y con leves variaciones durante el presente año (2007). Sin embargo, es recomendable, a fin de tener una caracterización de las aguas subterráneas más precisa, mejorar la frecuencia de los muestreos para distintas épocas del año.

Por otra parte, se observa que algunas características químicas evaluadas para la muestra de agua superficial recolectada en el río Macuto a nivel de la presa, son similares a las obtenidas para las muestras de agua recolectadas de los pozos. Lo anterior confirma la deducción señalada en un capítulo precedente de este trabajo, que indica que el Río Macuto recarga al acuífero en estudio.

13.1.2 Características físicas

Conductividad eléctrica: está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Debido a que la conductividad es función de la concentración y de la naturaleza de las sales disueltas, se tiene que la muestra M-PZ07 presenta el mayor valor registrado para esta propiedad, y por ser particularmente tan alto, se evidencia para el pozo de donde se obtuvo dicha muestra una intrusión de agua salada marina. Como es de esperarse, los valores de conductividad disminuyen a medida que la fuente se encuentra más alejada de la costa.

pH: es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H^+) en el agua. Para las muestras de aguas subterráneas analizadas se tiene que éstas presentan carácter ligeramente ácido, debido a que los valores de pH obtenidos resultaron menores a 7, mientras que la muestra de agua superficial, con un pH superior a 8, es de tipo básica.

Color verdadero: está asociado a sustancias en solución, en algunos casos el color del agua puede ser causado incluso por los iones de metales. Expresa el color de la muestra después de filtrada por membranas de $0,45 \mu m$ o, mejor, después de centrifugada. De los análisis físico-químicos aplicados a las muestras de agua, se puede determinar que la muestra de agua superficial y la M-PZ07 presentan los mayores valores para esta propiedad, sugiriendo así que estén presentes impurezas orgánicas.

Turbiedad: es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. La turbiedad en el agua es causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un ámbito de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia. Para las muestras de agua analizadas, se tiene que M-PZ07 y la muestra de agua superficial presentan alto grado

de turbiedad, mucho mayor para la primera de éstas, las demás muestras cuentan con unidades bajas para esta propiedad.

Dureza total: es la suma de las concentraciones de todos los cationes metálicos, menos los alcalinos, expresados en concentración equivalente al carbonato de calcio. En la mayor parte de las aguas, casi toda la dureza se debe al calcio y luego al magnesio, en las formas de bicarbonato y menos comúnmente como sulfato y cloruro. La muestra M-PZ01 es la que cuenta con mayor dureza, seguida por M-PZ07 y M-PZ03, mientras que el valor más bajo para esta propiedad lo presenta la muestra de agua superficial. La relación anterior permite confirmar que las muestras con mayor cantidad de Ca^+ son las que poseen mayor dureza.

Alcalinidad total: es impartida por bicarbonato, carbonato e hidróxido, siendo el bicarbonato el mayor ión encontrado debido a la considerable acción del bióxido de carbono sobre los metales básicos del suelo. Los valores de alcalinidad total para las muestras de agua subterránea analizadas son parecidos entre sí, es decir, presentan poca variabilidad, encontrándose el mayor valor en la muestra M-PZ07 y el menor valor en la muestra M-PZ03, por su parte, la muestra de agua superficial, presenta en comparación con las aguas subterráneas analizadas, un bajo valor para la propiedad en cuestión. De las relaciones anteriores se confirma que el grado de alcalinidad es proporcional al contenido de bicarbonatos.

13.2 Clasificación de las aguas

Las muestras de agua analizadas se clasificarán de acuerdo a los iones dominantes presentes, para ello se utilizará el diagrama de Piper o triangular, el cual es ideal para representar aniones y cationes en forma simultánea.

La utilidad de estos diagramas es la posibilidad de representar muchos análisis en un mismo gráfico, sin dar origen a confusiones. Las aguas químicamente semejantes se encontrarán agrupadas, y pueden clasificarse por su ubicación en el diagrama según el siguiente esquema:

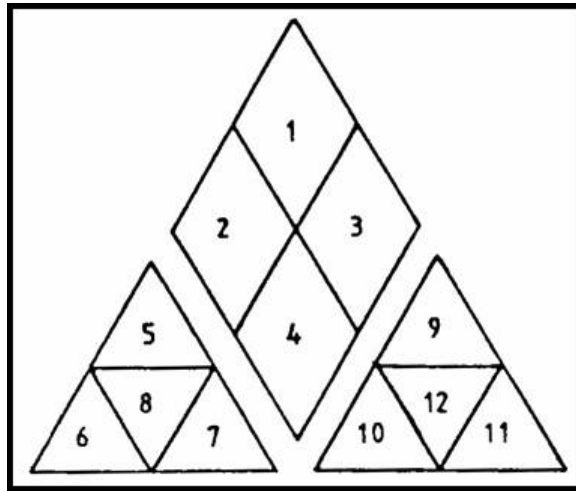


Figura 31.- Diagrama de Piper

- 1- Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas.
- 2- Aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
- 3- Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
- 4- Aguas bicarbonatadas sódicas.
- 5- Aguas magnésicas.
- 6- Aguas cálcicas.
- 7- Aguas sódicas.
- 8- Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas.
- 9- Aguas sulfatadas.
- 10- Aguas bicarbonatadas.
- 11- Aguas cloruradas.
- 12- Aguas sulfatadas, bicarbonatadas y cloruradas.

Para interpretar el diagrama con más detalle, debe considerarse que para su construcción es necesario que los iones estén reducidos a porcentaje de miliequivalentes por litro (meq/l). A cada vértice de un triángulo le corresponde el 100% de un catión o un anión.

Existen distintas variantes de estos diagramas. En este caso, se utiliza:

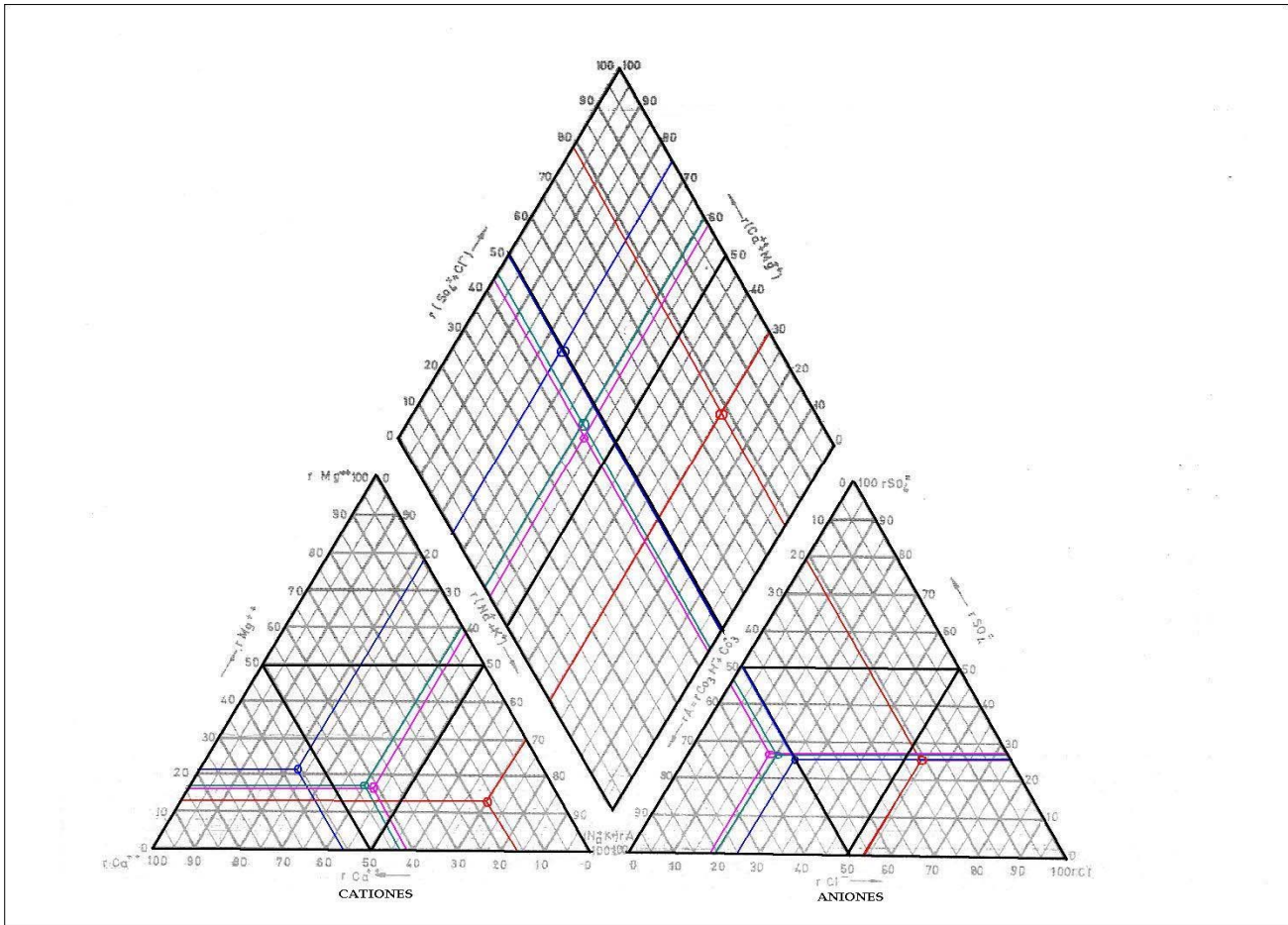
- Un triángulo para los cationes mayoritarios: ión calcio (Ca^{2+}), ión magnesio (Mg^{2+}), y la suma de los iones sodio y potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido de las agujas del reloj;
- Otro triángulo para los aniones mayoritarios: ión cloruro (Cl^-), ión sulfato (SO_4^{2-}), y la suma de los iones carbonato y bicarbonato ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido antihorario.
- Un diagrama romboidal integrador, en el que se representan la suma de los cationes ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) y ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) en un par de lados paralelos y complementarios, mientras en el otro par de lados se presenta la suma de aniones ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) y su complementario ($\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$).

Determinando los porcentajes de miliequivalentes por litro (meq/l) para las muestras de agua analizadas de los pozos (PZ01, PZ03, PZ07), y para la muestra de agua superficial, se tiene que:

Tabla 10. Porcentajes de los iones dominantes presentes en las muestras de agua recolectadas (meq/l)

	Porcentaje de miliequivalentes por litro (meq/l)					
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^{2+} + \text{K}^+$	Cl^-	SO_4^{2-}	$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$
M-PZ01	56,17	21,26	22,57	24,55	24,65	50,80
M-PZ03	43,33	16,51	40,16	20,07	25,98	53,95
M-PZ07	17,11	12,67	70,22	53,67	24,26	22,07
M-S	41,47	15,80	42,74	19,28	25,97	54,74

Graficando los valores anteriores en el diagrama de Piper se obtiene:



Leyenda:

M-PZ01

M-PZ03

M-PZ07

M-S

Figura 32.- Diagrama de Piper para las muestras de agua analizadas

Comparando el gráfico anterior con la figura 31, se determina que las muestras M-PZ01, M-PZ03 y M-S corresponden a aguas químicamente semejantes, debido a que se encuentran agrupadas, correspondiendo, de acuerdo a su ubicación en el diagrama de Piper a aguas del tipo 2: aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas. En cuanto a la muestra M-2, se clasificaría como aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

13.3 Calidad de las aguas para uso doméstico

El agua subterránea extraída de los pozos ubicados en el cono de Macuto se destina en su totalidad al consumo doméstico, por esa razón los análisis físico-químicos aplicados a las muestras de agua recolectadas en algunos de los pozos inventariados, se efectúan con la finalidad de determinar si esas aguas son aptas para ese tipo de consumo, ya que dependiendo del uso que se le de al agua; doméstico, agrícola o industrial, variarán los estándares de calidad.

Las aguas utilizadas para fines de abastecimiento doméstico deben ser de sabor y apariencia agradables; de composición química tal que pueda ser captada, transportada y distribuida sin presentar problemas de corrosividad o incrustaciones en el sistema; y debe garantizarse que la calidad química y microbiológica no ponga en peligro la salud de sus consumidores. En este estudio, el aspecto bacteriológico no se ha contemplado.

Los estándares utilizados en este trabajo para juzgar la adaptabilidad de las muestras de agua seleccionadas para uso doméstico, se encuentran establecidos en la Resolución del Ministerio de Sanidad y Asistencia Social N° SG018-98 de fecha 11 de febrero de 1998, publicada en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36395, contentivo de las Normas Sanitarias de Calidad de Agua Potable y que se señalan a continuación:

Tabla 11. Rangos permitidos para los parámetros físicos y químicos del agua para el consumo doméstico.

Componente o característica	Unidad	Valor deseable menor a	Valor máximo Aceptable ^(a)
Propiedades físicas y agregadas			
Color verdadero	UCV ^(b)	5	15 (25)
Turbiedad	UNT ^(c)	1	5 (10)
Dureza total (CaCO ₃)	mg/L CaCO ₃	250	500
Minerales Disueltos Calculados	mg/L	600	1000
Metales			
Aluminio (Al)	mg/L	0,1	0,2
Hierro (Fe)	mg/L	0,1	0,3 (1)
Manganeso (Mn)	mg/L	0,1	0,5
Sodio (Na)	mg/L		200
Constituyentes inorgánicos			
Cloruro (Cl ⁻)	mg/L	250	300
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250	500
pH		6,5-8,5	9,0
Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L		45
Nitrito (NO ₂ ⁻)	mg/L		0,03

^(a) Los valores entre paréntesis son aceptados provisionalmente en casos excepcionales, plenamente justificados ante la autoridad sanitaria.

^(b) UCV: Unidades de Color Verdadero.

^(c) UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

Comparando los valores reportados en los análisis físico-químicos para las muestras de aguas recolectadas de los pozos (Tabla 9) con los rangos permitidos para el uso del agua con fines de consumo doméstico (Tabla 11) se tiene:

M-PZ01: las características físico-químicas de la muestra cumplen con los requisitos para el uso del agua para consumo, ya que cada uno de los valores obtenidos para las

propiedades determinadas, se encuentran dentro de los límites deseados para el consumo del agua con fines domésticos.

M-PZ03: las características físico-químicas determinadas para la muestra indican que el agua es apta para el consumo, debido a que los valores obtenidos para cada una de las propiedades están dentro de los valores permisibles según la norma nacional vigente.

M-PZ07: agua no apta para el consumo doméstico. Las unidades de turbiedad presentes para esta muestra superan notablemente al valor máximo aceptable, así mismo ocurre con las concentraciones de sodio, hierro y el total de minerales disueltos, ya que sus contenidos superan incluso a los máximos permitidos.

Es recomendable ampliar los análisis y la frecuencia de los muestreos en diferentes épocas del año, a fin de detectar cambios estacionales de las aguas.

13.4 Calidad de las aguas para riego

En la actualidad las aguas extraídas de los pozos ubicados en el cono de Macuto están siendo utilizadas en su totalidad con fines domésticos. No obstante, las aguas se analizaron a objeto de determinar si son aptas para el riego de terrenos agrícolas de manera de posibilitar su aprovechamiento futuro.

Para determinar si las aguas subterráneas pueden ser destinadas a fines agrícolas, se efectuará el estudio correspondiente al índice de adsorción de sodio (RAS) y de la conductividad eléctrica, haciendo uso de los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos aplicados a las muestras de agua recolectadas.

13.4.1 Razón de absorción de sodio (RAS)

Estima la intensidad del intercambio iónico del calcio y magnesio con el sodio y potasio, que tiene lugar en los coloides y suelos arcillosos. Dicho índice se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$RAS = \frac{Na + K}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \dots\dots\dots (32)$$

La relación anterior origina cuatro tipos de clasificaciones de las aguas, las cuales se resumen en la tabla 12.

Tabla 12.- Clasificación del agua de acuerdo a la relación de absorción de sodio

RAS	Tipo	Características
<10	S ₁	Agua excelente, pocos daños por sodio, pueden utilizarse en la mayoría de los suelos.
10-18	S ₂	Aguas buenas, daños medianos por sodio. Pueden utilizarse en suelos de textura gruesa y suelos orgánicos de buena permeabilidad, pero ocasionan problemas en suelos de textura fina, a menos que contengan yeso.
18-26	S ₃	Aguas aceptables, daños altos por sodio en casi todos los suelos, excepto los de gran contenido de yeso. Pueden usarse en condiciones de buen drenaje y de alta lixiviación. Adiciones de yeso y materia orgánica pueden ser beneficiosas.
>26	S ₄	Aguas pobres, daño muy alto por sodio. No es satisfactoria para la mayoría de los propósitos de riego.

Resulta conveniente determinar el índice de absorción del sodio (RAS) debido al peligro que representa el sodio para los cultivos. Los dos efectos nocivos más importantes producidos por el sodio, son la reducción de la permeabilidad del suelo y el aumento de su dureza, esto afecta la infiltración y por ende la recarga de los acuíferos. Estos dos efectos son causados por el intercambio iónico del calcio y magnesio con el sodio, ya referido anteriormente.

Con los valores obtenidos mediante los análisis de las muestras de agua (Tabla 9), se tomaron los cationes Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ expresadas sus concentraciones en mg/l, efectuando la conversión a miliequivalentes por litro del ión respectivo para determinar la razón de absorción del sodio (RAS)

Tabla 13. Valores obtenidos de la relación de absorción de sodio para cada muestra de agua analizada

Muestra	Na+ (mg/l)	Ca++ (mg/l)	Mg++ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Na+ (me/l)	Ca++ (me/l)	Mg++ (me/l)	K ⁺ (me/l)	RAS
M-PZ01	25,90	59,90	13,60	3,00	1,13	3,00	1,13	0,08	0,84
M-PZ03	36,00	35,00	8,00	2,20	1,57	1,75	0,67	0,06	1,48
M-PZ07	210,00	45,00	20,00	4,00	9,13	2,25	1,67	0,10	6,60

Del cuadro anterior se puede observar que los índices de absorción de sodio determinados para las muestras de agua resultan ser menores a 10, lo cual, en atención a la tabla 12, clasifican a estas aguas como tipo S₁, que corresponde a aguas excelentes con poco riesgo de crear daños por sodio y que pueden utilizarse en la mayoría de los suelos.

13.4.2 Conductividad eléctrica

Otra vía empleada a efecto de determinar si las aguas subterráneas son aptas para usar en la agricultura, se realiza mediante el análisis de los valores de conductividad eléctrica que éstas poseen. La conductividad del agua es función de su temperatura, del tipo de iones presentes y de las concentraciones de éstos. Puesto que la conductividad se suele referir a 25°C, sus variaciones únicamente serán función del tipo y concentración de los constituyentes disueltos.

De acuerdo a la conductividad eléctrica se pueden clasificar a las aguas en cuatro tipos (Tabla 14):

Tabla 14. Clasificación del agua según la conductividad eléctrica

Conductividad Eléctrica($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tipo	Características
<250	C ₁	Aguas poco salinas, que pueden ser utilizadas para riego de cualquier cultivo, en suelos donde exista algún lavado, bajo prácticas comunes de riego.
250-750	C ₂	Aguas medianamente salinas, pueden ser utilizadas para riego de la mayoría de los cultivos en suelos con lavado moderado. Los cultivos resistentes a la salinidad pueden crecer sin prácticas especiales para el control de la salinidad.
750-2250	C ₃	Aguas altamente salinas, pueden ser usadas en suelos con buen drenaje, siendo necesario el empleo de prácticas especiales de manejo para el control de la salinidad.
>2250	C ₄	Aguas muy salinas, no adaptable para riego a menos que exista una combinación de condiciones favorables, el suelo debe ser permeable y tener buen drenaje. Debe aplicarse un exceso de lámina de riego para asegurar un buen lavaje. Sólo pueden sembrarse cultivos de alta tolerancia a la salinidad.

Al observar los valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para las muestras de agua recolectadas, se puede determinar que M-PZ01 y M-PZ03 son aguas de tipo C₂, caracterizadas por ser medianamente salinas y pueden utilizarse para riego en la mayoría de los cultivos en suelos con lavado moderado, mientras que M-PZ07, con un valor de 1260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se clasifica como un agua de tipo C₃, caracterizada por su alto grado de salinidad que deben ser utilizadas en suelos con buen drenaje, bajo estricto control de la salinidad.

Es práctica común, al momento de determinar si un agua es apta para uso agrícola, combinar los métodos de clasificación de las aguas antes descritos, así se tiene:

M-PZ01, M-PZ03: son aguas de tipo S₁C₂. Aguas con poco riesgo de crear daños por efecto de sodio, pueden ser utilizadas en riego de la mayoría de los cultivos en suelos que cuenten con un lavado moderado.

M-PZ07: agua de tipo S₁C₃. Aguas con poco riesgo de crear daños por efecto de sodio que pueden ser utilizadas en suelos con buen drenaje, siempre que se controle mediante procedimientos técnicos especializados el nivel de salinidad.

Resulta conveniente señalar, que a la hora de determinar si un agua es útil para riego de terrenos agrícolas, se deben tomar en consideración, además de las relaciones antes expuestas, otros factores, como los tipos de plantas que se deseen cultivar, las dosis de riego, la calidad del suelo y del clima local.

13.5 Calidad de las aguas para uso industrial

En general, es imposible cumplir con los requerimientos específicos de las numerosas industrias que pueden utilizar fuentes de abastecimiento para aguas de procesamiento. Es por esto que muchas industrias poseen sus propias fuentes de abastecimiento de agua, o aplican tratamiento correctivos complementarios y específicos para las aguas suplidas por las municipalidades.

Para usar las aguas en las industrias se disponen de límites de calidad química, por ejemplo en lo concerniente a los contenidos de hierro y manganeso, y al mantenimiento de un bajo contenido mineral (para el caso de lavanderías, fábricas de hielo, etc.), pero sin llegar al límite de hacerlas corrosivas.

Además, en las industrias, es importante que el agua se encuentre libre de sedimentos (para el caso en particular de refrescos carbonados), de materias orgánicas y de otros compuestos que produzcan olores y sabores a los productos industriales, en los cuales el agua es la materia prima esencial.

A partir de los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos, aplicados a las muestras de agua recolectadas en algunos pozos de la zona de estudio, se determina, con fines académicos, si estas aguas son aptas para el uso industrial, en función de las limitaciones de calidad del agua para determinados usos en el referido sector. En este sentido, se tiene que las aguas analizadas son aptas para las siguientes industrias:

M-PZ01: esta muestra cumple con los requerimientos de calidad establecidos para ser usada en las industrias de aire acondicionado, horneados, alimentos (general) y enlatados (general).

M-PZ03: puede ser utilizada en las industrias de aire acondicionado, hornos, enlatados (general), alimentos (general), papel y pulpa (de madera) y tenería.

M-PZ07: no es apta para ser usada en ningún tipo de industria, especialmente por su alta turbidez, dureza, alcalinidad y elevada concentración de hierro.

:

14. PROGRAMA PROPUESTO DE EXPLOTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL CONO ALUVIAL DE MACUTO

Un programa de explotación y aprovechamiento de las aguas subterráneas permite mejorar las condiciones de uso del recurso hídrico, así como optimizar la ubicación de nuevas obras de captación (pozos). Existen diversos factores determinantes para la explotación del acuífero, estos son:

1. Contaminación de las aguas subterráneas.
2. Intrusión salina.
3. Volumen de almacenamiento
4. Configuración del mapa potenciométrico.

14.1 Contaminación de las aguas subterráneas

El agua subterránea almacenada en el cono de Macuto en su estado natural, es de calidad físico-química satisfactoria y apropiada para el consumo humano. Sin embargo, algunas fuentes locales de agua subterránea, pueden ser contaminadas como el resultado de las actividades humanas. Un ejemplo es el relacionado con la disposición de las aguas residuales y contaminantes sólidos, así como también debido a la deficiente construcción de pozos que pueden servir de receptores de contaminantes al no ser sellados y carecer de apropiado mantenimiento.

En el cono aluvial de Macuto, se debe procurar hacer un adecuado tratamiento y distribución de los contaminantes y aguas servidas, mediante la ejecución de cloacas y colectores que eviten la contaminación del acuífero, dado que una vez deterioradas las aguas, sería muy difícil y costoso llevarlas a sus condiciones originales de pureza. La construcción de nuevos pozos hace necesario evaluar las características y presencia de contaminación biológica.

14.2 Intrusión salina

Para la evaluación de la intrusión salina en el cono aluvial de Macuto, se efectuaron dos secciones transversales (Figura 33) , el primero de éstos, (A-A') en la zona este del río entre los pozos PZ01 y PZ04, mientras que el segundo, (B-B') se realizó entre los pozos PZ03 y PZ07, a objeto de determinar la profundidad de la cuña salina en cada sector y así efectuar las recomendaciones pertinentes acerca de las profundidades que deben tener los pozos si se desea construirlos en determinados sectores y evitar riesgos de ser afectados por intrusión desde la interfase agua dulce-salada (figura 34).

La intrusión se produce por el movimiento del agua del mar en los acuíferos costeros, libres o cautivos, y al desplazarse el agua dulce de los acuíferos. Como consecuencia de la inclinación de la interfase, el frente de la intrusión salina suele presentar la forma y posición de la cuña de agua dulce- salada, que progresa tierra adentro cuando ocurre una sobreexplotación del agua dulce suprayacente, y que avanza hacia el mar. Cuando se produce una infiltración del agua de precipitación u otro tipo de recarga, el agua dulce y el agua salada se mezclan, dando lugar a una zona de dispersión.

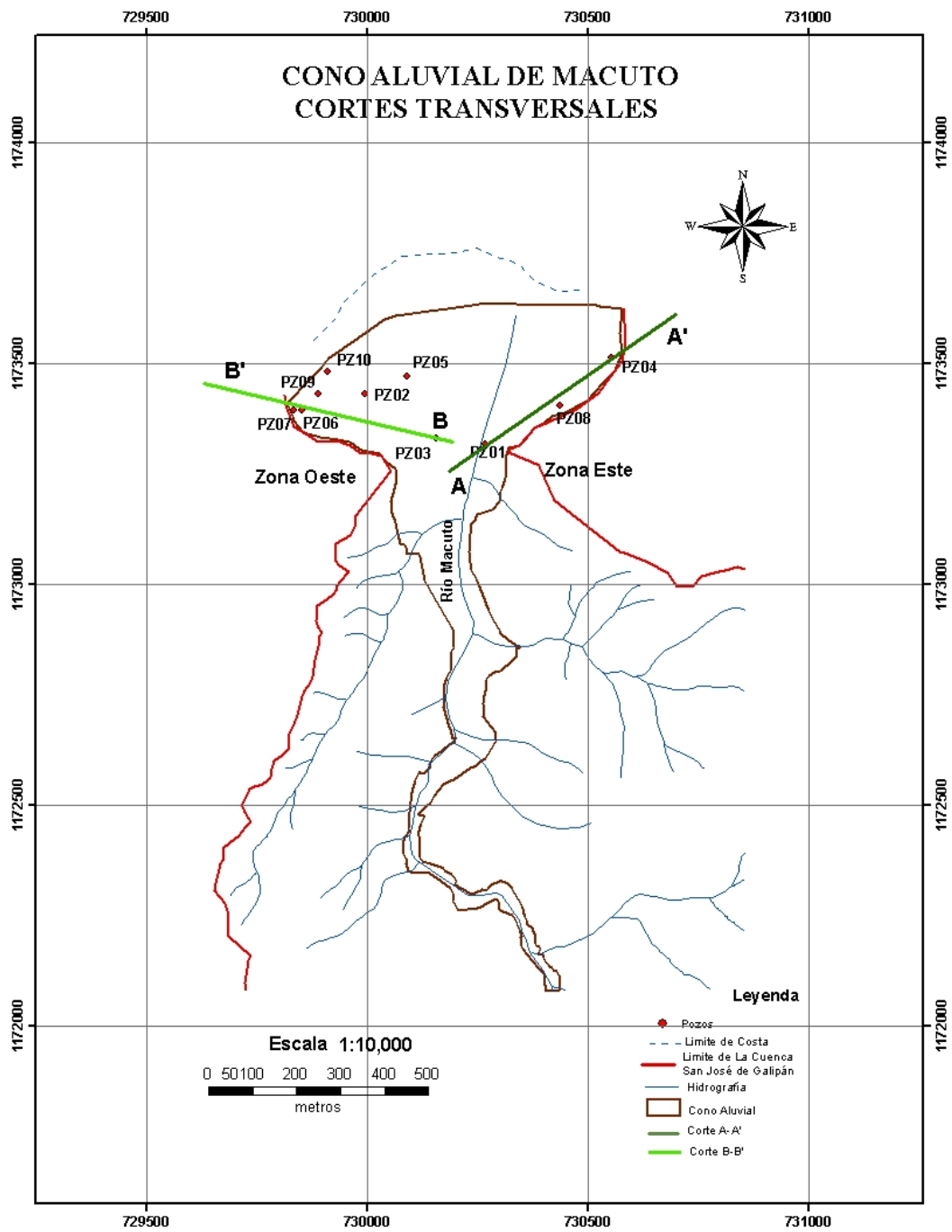


Figura 33. Mapa del cono de Macuto mostrando las secciones transversales A-A', B-B'.

Ghyben y Herzberg estudiaron el equilibrio hidrostático de masas inmiscibles de agua dulce y agua salada, a lo largo de una interfase. Junto a la costa la interfase tiende a inclinarse y, por lo tanto, la masa de agua dulce se acuña.

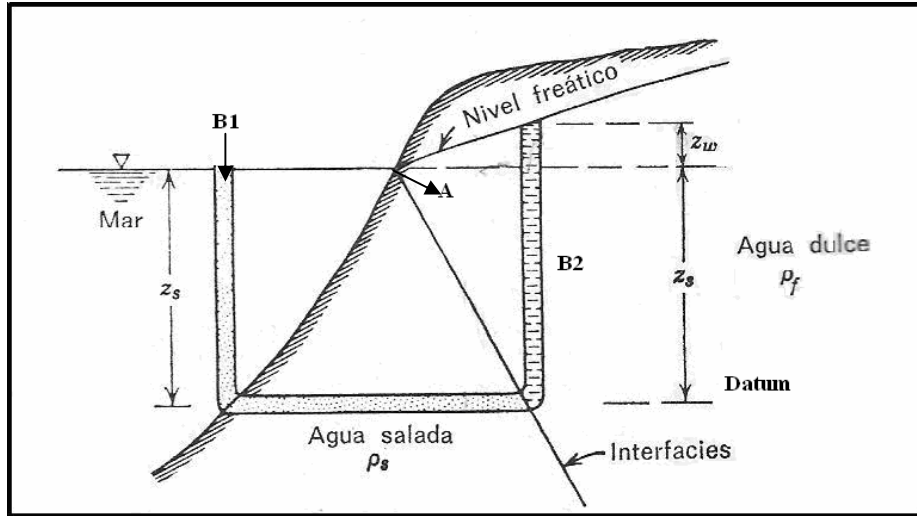


Figura 34.- Posición de la interfase agua dulce-salina

En la figura 34 se observa la sección transversal orientada hacia la línea de costa, donde se indica la interfase, el nivel del mar y el nivel freático, estos se interceptan en el punto -A-. La profundidad de la interfase, z_s , por debajo del nivel del mar, puede determinarse a partir de la compensación de presiones hidrostáticas en los vasos comunicantes (B1-B2) tomando la base del tubo comunicante como nivel del plano (Datum) de referencia para la z_s , resulta:

$$\delta_f = \rho_f g \therefore \delta_s = \rho_s g \dots\dots\dots (33)$$

$$z_s \delta_s = z_s \delta_f + z_w \delta_f \dots\dots\dots (34)$$

Sustituyendo (33) en (34) se tiene que:

$$z_s \rho_s g = g \rho_f z_s + g \rho_f z_w \dots\dots\dots (35)$$

Y despejando z_s :

$$z_z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \times z_w \dots\dots\dots (36)$$

Donde:

ρ_s - la densidad del agua salada

ρ_f - la densidad del agua dulce

δ_s - el peso unitario del agua salada

δ_f - el peso unitario del agua dulce

z_w es la altura de la superficie freática sobre el nivel del mar.

Considerando para $\rho_s = 1,026 \text{ g/cm}^3$ y $\rho_f = 1,000 \text{ g/cm}^3$ se obtiene finalmente:

$$z_s = 40z_w \dots\dots\dots (37)$$

De la ecuación (37) se deduce que el agua salada estará a una profundidad de 40 m. por debajo del nivel del mar, espesor que será compensado por un metro de carga de agua dulce que exista en el acuífero por sobre el nivel del mar.

En la tabla 15, la columna (1) indica las progresivas referidas a la posición del pozo (PZ01), en la columna (2), las cotas de la superficie del terreno, en la columna (3) los niveles piezométricos, en la columna (4) los valores de profundidad calculada de la cuña salina usando la ecuación (37). En la tabla 16 los valores indicativos de cada columna, son iguales que en la tabla 15 solo que las progresivas están referidas al pozo (PZ03).

Tabla 15. Datos obtenidos a partir del corte transversal A-A' en la zona ubicada al este del río Macuto, entre los pozos PZ01 y PZ04.

CORTE A-A' Zona este del río Macuto			
(1)	(2)	(3)	(4)
Progresiva (m)	Cota superficie del terreno (m.s.n.m)	Nivel Piezométrico (m.s.n.m)	Profundidad calculada de la cuña salina (m)
0	13,81	8,51	340,4
22	13,23	8	320
56	12,33	7	280
92	11,41	6	240
129	10,41	5	200
169	9,36	4	160
212	8,23	3	120
272	6,65	2	80
350	4,6	1,16	46,4

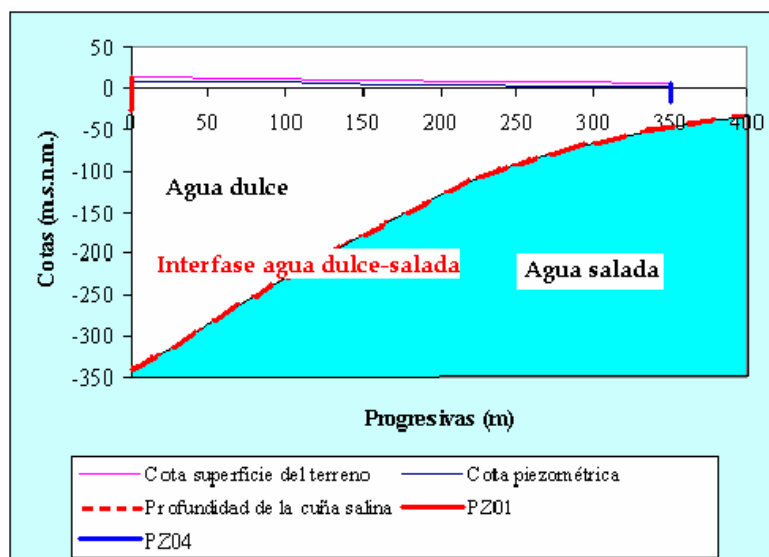


Figura 35. Representación de la interfase agua dulce-salada para el corte A-A' de la figura 33.

En la figura 35 se aprecia que los dos pozos representados (PZ01 y PZ04) no presentan efectos de la salinidad, ya que las profundidades de perforación y la

elevación del nivel freático con respecto al nivel del mar, evitan la intrusión del agua salina desde la interfase.

Tabla 16. Datos obtenidos a partir del corte transversal B-B' en la zona ubicada al oeste del río Macuto, entre los pozos PZ03 y PZ07.

CORTE B-B' Zona oeste del río Macuto			
(1)	(2)	(3)	(4)
Progresiva (m)	Cota superficie del terreno (m.s.n.m)	Nivel Piezométrico (m.s.n.m)	Profundidad calculada de la cuña salina (m)
0	14,1	8,01	320,4
21	13,48	7	280
44	12,8	6	240
72	11,98	5	200
101	11,13	4	160
134	10,16	3	120
177	8,9	2	80
250	6,76	1	40
310	5	0,55	22

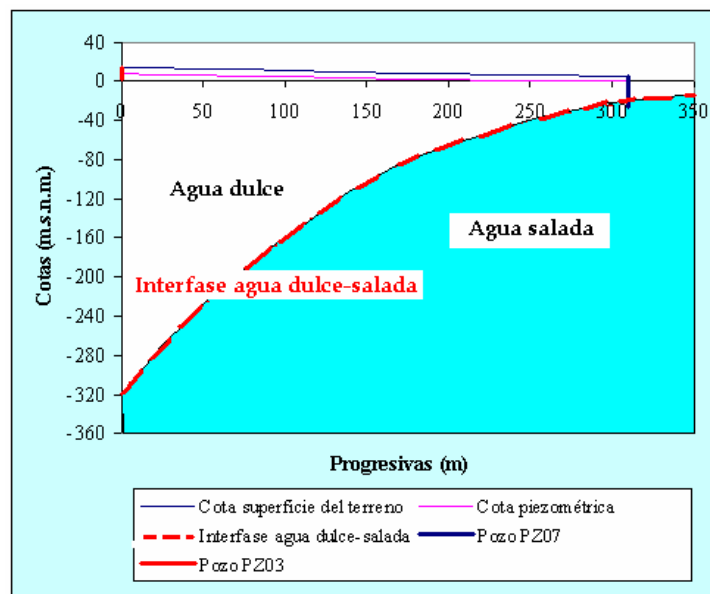


Figura 36. Representación de la interfase agua dulce-salada para el corte B-B' de la figura 33.

En la figura (36), se aprecia que el pozo PZ03 no presenta intrusión salina, debido a que su profundidad de perforación se encuentra notablemente alejada de la posición de la interfase: Mientras en el pozo PZ07 se observa invasión de agua salada, éste tiene una profundidad de 32 m y a partir de los 22 m de la misma, se produce una mayor aproximación con el agua de mar.

14.3 Radio de Influencia para la ubicación de nuevas obras de captación

Considerando el pozo PZ01 cuyo caudal de extracción fue de 12 lps, visto que con ese gasto el abatimiento fue de 0.63 m y asumiendo una relación lineal entre el caudal (Q) y el abatimiento (s), se estima que para un nuevo pozo de captación con el mismo caudal, en la intersección de ambos conos, el valor del abatimiento no exceda los 1.5 m.

De acuerdo a la ecuación para el radio de influencia:

$$R_b = 1.5 \sqrt{\frac{Txt}{S}} \dots\dots\dots(38)$$

Donde R_b es el radio de influencia debido al bombeo, T es la transmisividad ($m^2/día$), S es el coeficiente de almacenamiento y t es el tiempo donde el abatimiento es nulo (días).

Considerando que la transmisividad es $660 m^2/día$ y suponiendo un $S=5 \times 10^{-2}$ valor límite superior para acuíferos libres con $t= 0,2$ días. Aplicando la ecuación (38) se tiene que:

$$R = 1.5 \sqrt{\frac{660 \times 0.2}{5 \times 10^{-2}}} = 80 \text{ m}$$

Por lo tanto se puede asumir que de realizar la construcción de un nueva captación a 80 m del Pozo PZ01, el abatimiento resultante de la superposición del cono producido por ambos pozos no será superior a 1.5 m.

Para proyectos futuros de explotación de las aguas subterráneas y la perforación de nuevos pozos en el cono de Macuto, debe considerarse que la zona media del cono presenta materiales que gradan de más gruesos a más finos hacia la costa, y hacia el ápice la permeabilidad es mayor, al ensancharse el cono, los valores de los gradientes hidráulicos son mayores y existe una recarga favorecida por la existencia de la presa Macarao. Finalmente el riesgo de intrusión salina es mucho menor, debido a que las profundidades de la cuña salina se hacen mayores mientras más alejados se encuentren los pozos de la costa. Estos aspectos deben ser verificados en base a más detallados estudios y levantamiento de datos sobre la geología e hidrología local.

Estas consideraciones permitirán establecer una óptima explotación y aprovechamiento del agua subterránea y conservar la calidad del recurso con propósitos múltiples.

15. CONCLUSIONES

- En el cono de Macuto dos mecanismos han ejercido papel significativo en su origen: acumulación de materiales suministrados mayormente por flujos controlados por efecto de la gravedad y formados por flujos torrenciales.
- El origen geológico de la unidad que constituye el cono de Macuto representado por aluviones recientes formados por materiales gruesos de carácter gravo-arenoso, guarda estrecha relación con las unidades Esquisto de Tacagua, Serpentinita y Augengneis de Peña Mora, tal como lo refleja las composiciones mineralógicas de ésta y los sedimentos fluviales que forman el cono.
- La transmisividad determinada mediante las pruebas de recuperación en el pozo PZ06 y PZ07 varían entre 2490 y 910 m²/día respectivamente. Estos valores difieren probablemente debido a la composición de los diferentes materiales presentes en ambos sitios, siendo los de mayor permeabilidad los correspondientes al pozo PZ06. Así mismo, las discrepancias se pueden atribuir a las características de los pozos en cuanto a su diseño y las condiciones bajo la cuales, se realizaron las pruebas de bombeo.
- Los valores de la transmisividad obtenidas en los ensayos de recuperación y análisis de laboratorio ($T > 124$ m²/día) permiten establecer que el material corresponde a una formación explotable económicamente mediante pozos con fines de aprovechamiento.
- Las líneas de flujo del agua subterránea forman una superficie radial divergente con respecto a la posición del Río macuto. Esto es característico en la mayoría de los conos aluviales.
- Debido a la orientación radial-divergente de las líneas de corriente del flujo subterráneo, el río Macuto es fuente que recarga o alimenta al acuífero. Otras fuentes posibles se asocian a las rocas metamórficas fracturadas en contacto con los aluviones del cono.

- Por medio del mapa piezométrico se logró establecer que las principales direcciones del flujo de agua subterránea dentro del cono son al Noreste y Noroeste respecto al eje del río Macuto. Los gradientes hidráulicos determinados en ambas direcciones son 2,1 % y 3,5 % respectivamente.
- De acuerdo al análisis pluviométrico de la zona, utilizando las estaciones Maiquetía (climatológica) y Macuto (pluviométrica) para la parte baja de la cuenca y la estación Humboldt (climatológica) para la parte alta, se tiene que la época donde el acuífero logra incrementar el almacenaje del agua subterránea, corresponde al período comprendido entre los meses de Mayo y Noviembre, mientras que para los demás meses del año existe un déficit producto de una mayor descarga natural (evapotranspiración) en comparación con la recarga (infiltración causada por las precipitaciones).
- Los cálculos preliminares permiten afirmar que las reservas probables permanentes en el acuífero en el área de estudio es de aproximadamente 1.656.000 m³.
- El volumen de agua que anualmente se extrae del acuífero es igual a 478.400 m³, lo que representa el 29 % del agua total almacenada en el acuífero.
- Durante eventos de altas y continuas precipitaciones, como el ocurrido en el estado Vargas en diciembre de 1999, se verificó que la zona saturada se incrementó en promedio 5,5 m, esto conduce a un volumen de agua en la zona vadosa del cono de Macuto igual a 303.600 m³
- Al asumir que la porosidad en el cuerpo principal del cono es similar a la determinada en el laboratorio para la muestra captada en el depósito de sedimentos almacenados en el vaso del embalse Macuto e igual a 24 %, se tiene que, de acuerdo a los rangos de clasificación de la porosidad, el valor obtenido corresponde a materiales gruesos de porosidad alta.
- Al efectuar los análisis físico-químicos de muestras de agua recolectadas en algunos pozos de la zona, se concluye que la mayor concentración de sólidos disueltos (TSD) se encuentra en la zona costera, disminuyendo hacia las áreas

más alejadas de la referida, este comportamiento se presenta específicamente para los iones Mg^{+2} , Fe^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- .

- Las muestras de agua analizadas se clasifican como aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, a excepción de la muestra recolectada en un pozo cercano a la costa, que se clasifica como aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas, ya que este pozo, debido a su profundidad de perforación, se encuentra cercano a la interfase agua dulce-salada, verificándose de esta manera cierto grado de intrusión salina.
- El tipo de agua presente según la relación entre la conductividad eléctrica y la razón de absorción de sodio (RAS) es S_1C_2 , a excepción de la muestra de agua correspondiente al pozo cercano a la Costa que resultó ser de tipo S_1C_3 . En relación a las primeras, son aguas aptas para ser utilizadas en riego en la mayoría de los cultivos en suelos que se sometan a un lavado moderado, mientras que el segundo tipo, puede ser utilizada para riego siempre que se controle mediante procedimientos técnicos especializados el nivel de salinidad
- En cuanto a la calidad del agua para uso doméstico, se concluye que los resultados de los análisis físico-químicos, indican que la mayoría de los pozos analizados no presentan en sus aguas ningún tipo de restricción para el mencionado uso, excepto el agua extraída del pozo cercano a la costa (PZ07), debido a que presenta intrusión salina.
- A excepción del agua extraída del pozo cercano a la costa, y cuya situación local ha sido ya explicada, las aguas analizadas son aptas para los siguientes usos industriales: aire acondicionado, horneados, enlatados (general), alimentos (general), papel y pulpa (de madera) y tenería.
- Debido a que algunas características químicas obtenidas para la muestra de agua superficial recolectada en el río Macuto a nivel de la presa, son similares a las obtenidas para las muestras de agua captadas en los pozos, se refuerza el criterio de que las aguas superficiales del río Macuto recargan al acuífero bajo estudio.

16. RECOMENDACIONES

- En el momento de la perforación de un pozo en el cono de Macuto, las muestras extraídas del mismo deben ser descritas por personal calificado, y los perfiles estratigráficos deben prepararse en base a los análisis granulométricos que sean obtenidos, lo que permitirá obtener una visión más clara de los materiales existentes en el subsuelo.
- Recuperar en la medida de lo posible con las compañías constructoras de pozos la información obtenida, de manera que se pueda hacer una reconstrucción detallada o más precisa de los medios sedimentarios, que permita delimitar la interferencia entre los pozos, e incorporar los datos al inventario nacional que existe en el MARN.
- Realizar las necesarias pruebas de bombeo con gastos variables según el funcionamiento regular de la bomba y en tiempos de bombeo adecuados, para determinar parámetros hidráulicos del acuífero más representativos que los realizados con gastos bajos y en pruebas de corta duración.
- Debido a la poca profundidad de los pozos existentes y a la falta de descripciones litológicas adecuadas se hace difícil diferenciar entre las posibles capas permeables e impermeables del relleno aluvial, se recomienda la utilización de sondeos eléctricos, para ayudar a clarificar estos aspectos.
- Para complementar los análisis físico-químicos aplicados para determinar la calidad de agua para uso doméstico es conveniente efectuar análisis bacteriológicos a las muestras de agua.
- Con el fin de obtener un control más minucioso de la calidad del agua, es recomendable efectuar su análisis físico-químicos y bacteriológicos, al menos dos (2) veces al año, en el período lluvioso y en el de sequía.
- De requerirse el uso de las aguas subterráneas de la zona con fines industriales, se debe realizar el tratamiento previo de las mismas para que sus características físico-químicas, se adecuen a los estándares de calidad requeridos en cada caso.

- Debe delimitarse de manera más precisa la geometría del acuífero, lo que exige una exploración más detallada del mismo; lo que contribuirá a una correcta construcción de pozos y por consiguiente, a optimizar su aprovechamiento mediante programas racionales.
- Realizar sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio, para obtener información adicional y más completa sobre el contacto aluvión-roca y una mejor estimación de las reservas totales de agua, además de permitir la identificación de estructuras en el subsuelo.
- En la medida que se incremente la necesidad de agua para el suministro urbano, se sugiere analizar la posibilidad de construir pozos para la extracción de agua subterránea en los aluviones de relleno, situados hacia la parte acañonada del valle, donde se cuenta con recarga efectiva proveniente de las rocas metamórficas, que conforman las laderas del valle.
- La extracción del agua subterránea debe ser objeto de una regulación legal y de la debida supervisión por parte de las autoridades competentes en la materia (HIDROCAPITAL-MINISTERIO DEL AMBIENTE). Esto contribuirá al debido uso y aprovechamiento de ese recurso, y a su manejo en forma racional dado que el agua subterránea se considera un recurso renovable de utilidad pública.

BIBLIOGRAFÍA

- BENITEZ, A. (1972). **Captación de Aguas Subterráneas**. Madrid: Editorial Dossat S.A.
- BUKOR, K. Y TAGLIAFERRO, M. (2004). **Caracterización y cuantificación de sedimentos en la cuenca del río San José de Galipán, estado Vargas**. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Venezuela.
- CASTANY, G. (1969). **Métodos de Estudios e Investigación de los Acuíferos**. Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Dirección de Geología, Departamento de Aguas Subterráneas, Caracas. Venezuela.
- CASTANY, G. (1971). **Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas**. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- CASTANY, G. (1975). **Prospección y explotación de las aguas subterráneas**. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- DAVIS, S.N. (1971). **Hidrogeología**. Barcelona: Editorial Ariel.
- DURAN, D. Y LOBO, C. (2004). **Evaluación Hidrogeológica de las Reservas de Agua Subterránea del Acuífero de Los Llanos de Calabozo, estado Guárico, con el apoyo de Técnicas Nucleares**. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad de Los Andes, Mérida. Venezuela.
- HERAS, R. (1972). **Métodos Prácticos para el Estudio de Aguas Superficiales y Subterráneas**. Centros de Estudios Hidrográficos. Madrid. España.
- JOHNSON, E. (1975). **El Agua Subterránea y los Pozos**. Johnson División, U:O:P: Inc. Minnesota.
- LOW, J. (1960). **Geología de Campo**. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. (1995). **Calendarios de siembra para el estado Miranda y el Distrito Federal**. Caracas: Vidal Sáez.

- MOROS, E. Y PORTILLA, J. (2006). **Evaluación del potencial Hidrogeológico de la zona de Carayaca, Estado Vargas.** Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Venezuela.
- MUÑOZ, A. (1988). **Estudio Hidrogeológico y Régimen de Aguas Subterráneas del 10 Acuífero de Maracay, Estado Aragua.** Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Venezuela.
- NIETO, G. (2003). **Geología de la Cuenca del Río San José de Galipán y la quebrada Alcantarilla, Flanco Norte del Ávila. Estado Vargas.** Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Venezuela.
- OLIVAR, M Y PEDRIQUE, R. (2006). **Evaluación Hidrogeológica del Valle del Río Tucutunemo, Municipio Zamora, Estado Aragua.** Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Venezuela.
- PEREZ MACHADO, J.L. (1979). **Fundamentos del Ciclo Hidrológico.** Facultad de Ingeniería. U.C.V. Caracas. Venezuela.
- SANCIO, R. (1965). **Evaluación de la Recarga de los Acuíferos de una Cuenca para la Explotación Racional del Agua Subterránea.** Boletín Informativo. Sociedad Venezolana de Geología, Minería y Petróleo. Caracas. Venezuela.
- TODD, D. (1973). **Hidrología. Agua Subterránea.** Madrid: Editorial Paraninfo.
- Universidad Central de Venezuela. (1967). **Desarrollo de aguas subterráneas.** Caracas.
- URBANI, F. Y RODRÍGUEZ, J. (2004). **Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela FUNVISIS.** Caracas: VENEZUELA CD.

GLOSARIO

Abatimiento: es la diferencia de elevación entre el nivel estático del agua y el nivel dinámico de bombeo en un pozo.

Abatimiento residual (Descenso residual): es la diferencia entre el nivel del agua en el pozo a un tiempo t y el nivel final obtenido al cesar el bombeo.

Antrópica (actividad): conjunto de acciones que el hombre realiza en un espacio determinado de la Biosfera, con el fin de garantizar su bienestar.

Ápice (cono): extremo superior o punta del cono.

Aragonito: es una de las formas cristalinas del carbonato de calcio (CaCO_3), junto con la calcita. Puede encontrarse en forma de estalactitas, y también en la concha de casi todos los moluscos y en el esqueleto de los corales.

Carga hidráulica: es la energía presente en un sistema hidráulico normalmente tiene dos componentes: **a)** la carga relacionada con la elevación con respecto a un nivel de referencia (datum) y **b)** la carga de presión o presión de poros. En el flujo subterráneo, la carga de velocidad se considera despreciable

Coloides: partículas sólidas, de tamaño mesoscópico (es decir, a medio camino entre los mundos macroscópico y microscópico). Se trata de partículas que no son apreciables a simple vista, pero mucho más grandes que cualquier molécula.

Conductividad hidráulica (K): se dice que un material es permeable cuando permite el paso de un fluido a través de sus poros; es decir, la capacidad de un medio poroso para transmitir agua.

Detritus: resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas de menor tamaño.

Diagénesis: proceso de formación de una roca a partir de sedimentos sueltos que sufren un proceso de consolidación.

Dolomita: roca sedimentaria formada por carbonato de calcio y magnesio [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$].

Esquisto: grupo de rocas metamórficas de grado medio, notable principalmente por la preponderancia de minerales laminares tales como la mica, la clorita, el talco, la hornblenda, grafito y otros. Contiene más de un 50% de minerales planos y alargados, a menudo finamente intercalado con cuarzo y feldespato.

Falla: Estructura geológica formada por desplazamientos relativo de una parte de la roca o estructura con respecto a la otra, como resultado de los esfuerzos que se generan en la corteza terrestre.

Feldespato: grupos de minerales constituyentes de las rocas ígneas y metamórficas. Los feldespatos corresponden a los silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio y magnesio o mezclas de esas bases. Su estructura consiste en una base de silicio (Si^{4+}) en la que una parte ha sido sustituida, isomórficamente, por aluminio. Al desequilibrarse las cargas se compensan con cationes metálicos (k^+ , Na^+ , Ca^{+2}).

Gavión: muro de piedra sostenido y fijado con malla de alambre que se usa como elemento de sostenimiento o contención de una masa de suelos o rocas.

Gradiente hidráulico (dh/dx): Variación del potencial o de la energía del flujo subterráneo por unidad de longitud en una dirección determinada.

Illita: arcilla no expansiva, micácea. Es un filosilicato o silicato laminar. Estructuralmente, la illita es bastante similar a la moscovita o a la sericita con un contenido superior de silicio, magnesio, hierro, agua y ligeramente menos aluminio tetrahédrico y potasio interlaminar. La fórmula química es $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$

Isopiezas: líneas de igual elevación del agua subterránea.

Litodemo: unidad litodémica fundamental caracterizada por ser una roca intrusiva, muy deformada o con alto grado de metamorfismo, con homogeneidad lítica, en general no tabular y carente de estructuras primarias de sedimentación.

Lixiviado: líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

Nivel de bombeo: es el nivel alcanzado en el pozo a un tiempo -t- debido al bombeo.

Nivel estático: nivel alcanzado en el pozo cuando no opera el bombeo.

Nivel piezométrico: elevación del agua subterránea en pozo o piezómetro referido al nivel medio del mar.

Permeámetro: aparato que sirve para medir la permeabilidad de los materiales ante el paso de fluidos a través de ellos. Es un método directo de medir mediante un modelo físico, el coeficiente de permeabilidad.

Radio de influencia (Rb): es la distancia, medida horizontalmente en la superficie del terreno, desde el centro del pozo bombeado, hasta un punto tal, a partir del cual se puede considerar que los descensos producidos por el bombeo son nulos.

Superficie potenciométrica: es la superficie superior de los acuíferos llamada también superficie de depresión, debido a que las líneas isopiezas decrecen en el sentido del movimiento.

Transmisividad: es el caudal que se filtra a través de una faja vertical de terreno de ancho unitario y de altura igual a la del estrato permeable saturado bajo un gradiente hidráulico unitario, a una temperatura fija determinada.

Unidad litológica (sinónimo de formación): conjunto de materiales geológicos compuestos predominantemente de cierta asociación de minerales y rocas, que tienen un origen común, se formó en un ambiente geológico y presenta una edad similar.

Velocidad de filtración: velocidad del flujo subterráneo a través de los intersticios y espacios intergranulares del medio poroso.

