



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Análisis y Evaluación de la Salinidad en la Zona de Taura

TOPICO DE GRADUACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN GEOLOGÍA

Presentada por:

Ernesto Barragán Chang

GUAYAQUIL-ECUADOR

Año: 2002

AGRADECIMIENTO

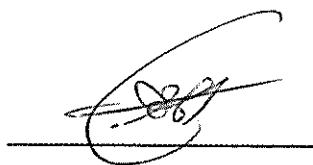
A todas aquellas personas que
colaboraron y me apoyaron en
la realización de este proyecto
y especialmente a el Ingeniero
Jorge Calle Director de Tópico
por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A MIS QUERIDOS PADRES

A MIS HERMANOS, que sin
su apoyo, hubiera resultado
imposible realizar mis metas

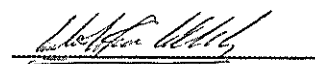
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Edison Navarrete C.

DECANO DE LA FICT

PRESIDENTE



Ing. Jorge Calle

DIRECTOR DE TÓPICO



Dr. Paúl Carrión M.

VOCAL



Ing. Francisco Torres

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este
Tópico de Graduación, me corresponden
exclusivamente; y el patrimonio intelectual
de el mismo a la ESCUELA SUPERIOR
POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

ERNESTO BARRAGAN CHANG

RESUMEN

El presente estudio está enfocado a la determinación de la posible intrusión salina, presumiblemente ocasionada por la sobreexplotación de los recursos acuíferos en la zona de Taura, por parte de las haciendas en las cuales se extrae el agua para el consumo humano, para fines de riego y para el llenado de las piscinas de las camaroneras que han proliferado en los últimos años en este sector.

En su primera parte se revisan todos los fundamentos teóricos necesarios para realizar el presente estudio (Análisis químicos del agua de los pozos, Sondeos Eléctricos Verticales, Registros Litológicos, Testificación Eléctrica en Pozos).

Luego se realizan los análisis de los datos obtenidos mediante la exploración hidrogeológica, con los que se logró determinar, efectivamente la presencia de una intrusión salina importante en la zona de estudio, agudizada por la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos existentes en el sector, por parte de las haciendas.

INDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	I
ABREVIATURAS.....	III
SIMBOLOGÍA.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Trabajos Previos.....	1
1.2. Localización del Área.....	2
1.3. Características Generales del Clima.....	3
2. GEOLOGÍA	5
2.1. Marco Estratigráfico.....	5
2.2. Rasgos estructurales e Historia Tectónica.....	8
2.3. Geología Local.....	13
2.4. Geomorfología.....	14
2.5. Exploraciones hidrogeológicas.....	16
2.5.1. Perforaciones.....	16
2.5.2. Registros Litológicos.....	18
2.5.3. Testificación Eléctrica en Pozos.....	27

3.	GENERALIDADES DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS.....	33
3.1.	Teoría de la Resistividad.....	34
3.2.	Tipos de Dispositivo.....	41
3.3.	Método de Interpretación.....	44
3.4.	Toma y Procesamiento de los datos de campo obtenidos en los sondeos eléctricos.....	46
4.	AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	63
4.1.	Circulación del agua en el subsuelo.....	63
4.1.1.	Ley de Darcy.....	63
4.1.2.	Gradiente Hidráulico.....	65
4.1.3.	Permeabilidad.....	67
4.1.4.	Caudal.....	71
4.1.5.	Transmisibilidad.....	74
4.2.	Calidad Química del agua de los pozos.....	75
4.3.	Relaciones Agua Dulce-Agua Salada.....	84
4.3.1.	Intrusión Salina.....	85
4.3.2.	Técnicas de Estudio de la relación agua dulce-salada.....	87
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	91
5.1.	Conclusiones.....	91
5.2.	Recomendaciones.....	94
6.	Anexos.....	95
7.	Bibliografía.....	99

ABREVIATURAS

cm	Centímetro
c.p.s.	Ciclos por segundo
g	Gramos
kg	Kilogramo
l	Litros
m	Metro
meq	Miliequivalente
mg	Miligramos
mA	Miliamperios
mV	Milivoltios
ppm	Partes por millón
ppt	Partes por mil
E	Este
SP	Potencial Espontáneo
TSD	Total de Sólidos Disueltos
W	Oeste



SIMBOLOGÍA

ρ	Resistividad
ρ_a	Resistividad aparente
Ω	Ohmio
$\Omega\text{-m}$	Ohmio-metro
γ	Peso específico
μ	Viscosidad
e	Espesor
i	Gradiente Hidráulico
k	Factor Geométrico, Permeabilidad
l	Longitud
m	Porosidad
p	Presión de Flujo
q	Caudal unitario
r	Radio
s	Sección transversal
v	Velocidad
t	Tiempo
I	Corriente
H	Altura de la carga de agua
Q	Caudal
R	Resistencia
T	Transmisibilidad
V	Gradiente de potencial

ÍNDICE DE FIURAS

Figura 2.1.	Columna Litológica Pozo P2.....	21
Figura 2.2.	Columna Litológica Pozo P3.....	22
Figura 2.3.	Columna Litológica Pozo P6.....	23
Figura 2.4.	Columna Litológica Pozo P9.....	24
Figura 2.5.	Columna Litológica Pozo P11.....	25
Figura 2.6.	Columna Litológica Pozo P14.....	26
Figura 2.7.	Registros Eléctricos (SP y Resistividad) Pozo P3.....	29
Figura 2.8.	Registros Eléctricos (SP y Resistividad) Pozo P6.....	31
Figura 3.1	Esquema de Sondeo Eléctrico.....	35
Figura 3.2.	Diagrama esquemático del dispositivo de resistividad.....	36
Figura 3.3.	Patrón de flujo de corriente (líneas llenas) y el patrón de superficies equipotenciales.....	37
Figura 3.4.	Esquema del dispositivo Schlumberger.....	42
Figura 3.5	Curva de campo de resistividad aparente vs Profundidad.....	44
Figura 3.6.	Sondeo a.....	48
Figura 3.7.	Sondeo b.....	50
Figura 3.8.	Sondeo c.....	52
Figura 3.9.	Sondeo d.....	54
Figura 3.10.	Sondeo e.....	57
Figura 3.11.	Sondeo f.....	59
Figura 3.12.	Corte Geoelectrico.....	61
Figura 4.1.	Experiencia de Darcy.....	63
Figura 4.2.	Cálculo del gradiente hidráulico.....	66
Figura 4.3.	Diagrama Triangular.....	81
Figura 4.4	Cuña de agua salada en un acuífero costero.....	84
Figura 4.5	Formación de agua salada debajo de captaciones.....	85



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Ubicación de los Pozos.....	18
Tabla 2	Ubicación de Sondeos Eléctricos Verticales.....	47
Tabla 3	Datos de los análisis químicos.....	82

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio ha sido realizado, en la zona de Taura, en vista de que se han observado valores relativamente altos en la salinidad del agua de los pozos de los cuales se extrae el agua para el consumo humano, para fines de riego por parte de las haciendas y para el llenado de las piscinas de las camaroneras que han proliferado en los últimos años en este sector, lo que conduce a pensar que podría deberse a una posible intrusión salina en los acuíferos existentes en el subsuelo. El presente estudio está enfocado a la determinación de la posible intrusión salina, presumiblemente ocasionada por la sobreexplotación de los recursos acuíferos.

1.1. Trabajos Previos

En la zona de estudio y en los sectores aledaños se han realizado varios estudios concernientes a la investigación hidrogeológica, entre estos tenemos los siguientes:

Instituto Ecuatoriano de Recursos Hídricos. (INERHI). Proyecto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de

Yaguachi, Banco de Arena, Milagro. Estudio de factibilidad. Anexo E: Hidrogeología. 1977

CHAS T. MAIN INT. INC. El estudio de pre-factibilidad y factibilidad de los proyectos Milagro y Manuel J. Calle en la cuenca del Río Guayas, 1968.

GUAYASCONSULT, T. INGLEDOW ASSOCIATES LTD. CEDEGE. Investigación de las oportunidades de desarrollo económico de la cuenca del río Guayas. Reconocimiento hidrogeológico de la baja cuenca del Guayas. 1970.

Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos. (INERHI). Proyecto Naranjal-Río Siete. Estudio hidrogeológico. 1975.

Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos. (INERHI)-Consultora Real Holandesa de Ingenieros y Arquitectos (HASKONING). Estudio de factibilidad y diseño del control de inundaciones de la cuenca baja del Guayas. 1988.

1.2. Localización del Área

La zona de estudio se encuentra ubicada en la zona de Taura, Parroquia Taura, Cantón Naranjal, Provincia del Guayas. Se accede a la zona por la carretera que conduce desde el Km. 19 de la vía Durán-

Tambo, hasta el pueblo de Taura. El cuadrángulo que limita la zona de estudio tiene las siguientes coordenadas UTM:

A (630000, 9758000)

B (662000, 9758000)

C (662000, 9743000)

D (630000, 9743000)

Con un área aproximada de 480 Km². (Mapa 1)

1.3. Características Generales del Clima

El clima está caracterizado por una marcada estacionalidad, que provoca un desbalance de precipitaciones, con inundaciones en extensiones importantes en la temporada de lluvias (enero a mayo, “estación” llamada invierno), con máxima pluviosidad en marzo, y escasez de agua en la época seca (junio a diciembre, “estación” llamada verano), con escasas precipitaciones entre septiembre y octubre (garúas).

La región mantiene una pluviosidad que fluctúa entre los 1000 a 1500 mm. anuales, con períodos lluviosos relacionados con la Corriente Cálida de “El Niño”, que se extiende desde diciembre o enero, hasta abril o mayo, alternando con períodos secos con una marcada influencia de la corriente Fría de Humboldt que abarca el resto del

año, período caracterizado por fuertes vientos y bajas temperaturas.

Los vientos ocurren desde el SO, con variada intensidad alcanzando velocidades de hasta 7 Km/h, los que tienen como una barrera natural los cerros de Taura, próximos al área de estudio.

Las temperaturas están en correspondencia con los períodos climáticos descritos y van desde 20 a 30°C, con extremos de 18 a 36°C, con sensación térmica de extremo frío en la época seca.

CAPITULO 2

2. GEOLOGÍA

2.1. Marco Estratigráfico

Dos tipos de rocas sedimentarias yacen sobre el basamento oceánico de la región: Rocas tipo flysch, con edades que van desde el Cretáceo superior hasta el Eoceno inferior y del tipo molásico, desde el Oligoceno superior hasta el Cuaternario (Dugas 1987).

Las rocas del tipo flysch se originaron en depósitos de extensión variable, desde el Turoniano hasta el Eoceno superior, debido a una tectónica de bloques fallados, aquí se incluye a la Formación Cayo. La mayoría de los sedimentos fueron depositados en un profundo talud, en acumulaciones turbidíticas.

Los sedimentos del tipo molásico están representados por los depósitos fluviales y estuarinos.

El material de los depósitos cuaternarios se origina en la cordillera occidental, en la que predominan rocas volcánicas de tipo andesitas o diabasas, con preponderancia de feldespatos calco-sódicos y minerales ferromagnéticos. Por eso, en la arena de la zona no se encuentra mucho cuarzo e inclusive tiene a menudo color oscuro.

Formación Cayo (Turoniano superior-Maestrichtiano)

La formación Cayo es la primera cubierta sedimentaria sobre la formación Piñón. Está constituida por tres miembros: Calentura, Cayo s.s. y Guayaquil hacia el tope (Bristow y Hoffstetter 1977).

Formación Calentura (Turoniano superior)

Este miembro consiste de areniscas y lutitas tobáceas silíceas y calcáreas con algunas capas de calizas arenosas. Según los foraminíferos y los moluscos (inoceramus), su edad ha sido establecida como Turoniano superior, (Bristow y Hoffstetter 1977). Este miembro tiene un espesor aproximado de 100 metros.

Formación Cayo s.s. (Senoniano)

Se trata de una serie potente, aproximadamente 1400 metros, de alternancias de brechas sedimentarias, de areniscas finas y gruesas de color verdoso de composición grauváquica y lutítica. Los bloques

de la brecha sedimentaria están constituidos principalmente por andesita con cantos de tamaño variable de hasta 2 metros de diámetro. Numerosos fragmentos de arenisca verdosa, dominan en la base de la secuencia y mientras que las lutitas se intensifican al tope de la sección pasando transicionalmente al miembro Guayaquil. En la base del miembro Cayo s.s. se encuentran algunos metros de capas finas de lutitas calcáreas interestratificadas con areniscas gruesas y brechas sedimentarias. Los sills y diques de andesitas ocurren en este miembro al que se ha designado una edad Senoniano según su fauna micropaleontológica (Bristow y Hoffstetter 1977).

Formación Guayaquil (Maestrichtiano)

Su litología comprende argilitas silicificadas con capas de chert, argilitas tobáceas y areniscas finas con un espesor total de 400 metros aproximadamente. La silicificación (cherts de las capas es posterior a la sedimentación (Sinclair y Berkey 1924). De hecho se observan en los pliegues de gravedad que los hertz siguen perfectamente las deformaciones casi sin fracturas lo que demuestra que la deformación fue posterior a la silicificación en los sedimentos no consolidados.

Depósitos Estuarinos (Holoceno)

Constituidos por depósitos someros emergidos recientemente. Se trata de limos, arenas, arcillas y lumaquelas, depositadas en la planicie de la baja Cuenca del Guayas.

Estos depósitos se encuentran sobreyacentes, en algunos sectores, a los Tablazos, y su espesor varía fuertemente, habiéndose reportado hasta 100 metros. La emersión general de la región se evidencia por el cambio de ambiente de depositación, durante el Cuaternario entre la Formación Tablazo abajo y esta sedimentación estuarina (Dugas 1987).

Depósitos Aluviales (Holoceno)

Lo integran conglomerados, arenas, limos y arcillas depositadas a lo largo de los actuales ríos, dispuestos en terrazas emplazadas sobre las formaciones anteriores, excepto los depósitos estuarinos que son contemporáneos (Dugas 1987).

2.2. Rasgos estructurales e Historia Tectónica

Regionalmente en el Sur de la costa ecuatoriana , se observan rasgos estructurales, que nos indican una tectónica de bloques fallados.

La Cuenca del Guayas perteneciente al Mio-Plioceno, rellena por espesores importantes del Plio-Cuaternario. Finalmente el Golfo de guayaquil, que representa la depresión actual.

Dos rasgos tectónicos importantes se identifican en la costa ecuatoriana: uno, relacionado con la tectónica de fallamientos sucesivos de bloques inclinados diferentemente, que a lo largo de la historia estructural de la región, ha creado un sistema de horsts y grabens; y otro, relacionado con el desplazamiento de grandes masas, originando cuerpos alóctonos, de controvertida interpretación.

A continuación se describirá la secuencia de eventos que tuvieron lugar durante la evolución geológica de la costa del Ecuador:

Una fase de compresión, iniciada por un desplazamiento del piso oceánico, en el Cretáceo medio. A partir del Turoniano superior, en las partes deprimidas de la dorsal y lejanas a zonas continentales, se acumularon sedimentos pelágicos de consistencia silíceo y carácter turbidítico profundo que constituyeron los Miembros Cayo y Guayaquil de edad Senoniano y Maestrichtiano, respectivamente; a esta fase de compresión algunos investigadores atribuyen el metamorfismo de la corteza oceánica, que produjo los metaesquistos verdes de la Formación Churute, así como también algunas rocas sedimentarias (Formación Punta de Piedra). Las intrusiones granodioríticas existentes en el área, han sido interpretadas como consecuencia de la continentalización del piso oceánico (Labrouse, 1985).

Un mecanismo de acreción de corteza oceánica, tuvo lugar al fin del Cretáceo (Formación Macuchi), así como la formación de una fosa y un talud profundo, emplazados al Sur de la Cordillera de Chongón-Colonche, la cual se encontraba en proceso de levantamiento. La depresión fue rellenada en principio por flysch turbidítico del Grupo Azúcar inferior (Formación Estancia), de edad Paleoceno y posteriormente por descargas de areniscas y conglomerados en depósitos de canales (Formación Chanduy), gracias a la pendiente SE-NW que existía desde los cerros de Amotape en el Norte de Perú hacia la Península de Santa Elena, a través del Golfo de Guayaquil.

En el Eoceno medio, un flysch turbidítico calcáreo (Formación San Eduardo), se depositó en los bordes de la Cordillera Chongón-Colonche y del Horst Azúcar-Playas; siendo sus aportes calcáreos, provenientes de la Cordillera Occidental de los Andes, donde se reportan arrecifes (DGGM,1982).

Al fin del Eoceno medio un evento tectónico importante, levantó la pendiente que se mantenía en el sentido SE-NW, movilizand o el talud hasta adquirir una inclinación hacia el SW y formar la Cuenca Ancón. Como consecuencia de este levantamiento, en el Eoceno superior se originaron deslizamientos del Grupo Azúcar y en algunos sectores de la Cordillera de Chongón-Colonche, del Miembro Guayaquil Chert y

Piñón, hacia la Depresión Ancón. De esta manera, bloques de diversos tamaños, relacionados con las formaciones pre-existentes, se desplazaron, usando como matriz un flysch silíceo, con turbiditas distales, que rellenaban la depresión, constituyendo así la Formación Socorro, denominada Wild Flysch, de la Península de Santa Elena y de la región litoral, hasta Puerto López al norte. Capas masivas de grauvacas y mantos delgados de areniscas y lutitas, se acumularon sobre Socorro, constituyendo la formación superior del Grupo Ancón (Formación Seca). En el norte de la Cordillera de Chongón-Colonche, la formación San Mateo es el equivalente directo de Socorro.

Una laguna estratigráfica regional, separa el Eoceno superior y el Oligoceno superior; haciéndose evidente por la ausencia de depósitos de estas edades.

Durante el Oligoceno superior se intensificó el levantamiento de la cordillera de Chongón-Colonche, dando origen al hundimiento de algunas áreas, como la cuenca de Manabí, Cuenca del Guayas y el Golfo de Guayaquil. Este evento se relaciona directamente con un movimiento dextral de la falla transcurrente Guayaquil-Dolores, que con rumbo paralelo a los andes se emplazó perpendicularmente al eje longitudinal de la Cuenca Progreso.

Al fin del Oligoceno superior y durante el Mioceno inferior, se produjo una transgresión marina, dando origen a la acumulación de un relleno tipo molásico, de más de 5000 metros de espesor (Formación Tosagua, Subibaja y Progreso en la Cuenca Progreso y sus equivalentes Angostura Onzole y Borbón en la Cuenca de Manabí).

Al fin del Mioceno superior y principios del Plioceno, un evento tectónico hizo emerger la cuenca de Manabí y Progreso, mientras que una sedimentación más litoral siguió en la Cuenca del Guayas y Golfo de Guayaquil, al pie mismo de la Cordillera Occidental. Por efecto de este nuevo movimiento de bloques, se levantó definitivamente la Cordillera de Chongón-Colonche; y los escalones del flanco Sur, se curvaron y deslizaron parcialmente las capas de la Formación Subibaja y del Miembro Bellavista.

En el estuario de la alta cuenca del Guayas y durante el Plioceno se sedimentó la Formación Balzar, mientras que al mismo tiempo y en el Golfo de Guayaquil se depositó la Formación Puná.

Durante el Cuaternario y después de un débil hundimiento de toda la región, que permitió la acumulación de los Tablazos en el Litoral y la Formación Pichilingue, en la alta cuenca del Guayas, se produjo el levantamiento general de la región, que hizo emerger estas

formaciones, mientras que la sedimentación continuó en el Golfo de Guayaquil. Al final el resultado de todo este tectonismo y acumulación de sedimentos dio a la costa su forma actual, que es como la conocemos.

2.3. Geología Local

La zona de estudio ocurre sobre depósitos recientes no consolidados de origen aluvial. Superficialmente se encuentra una cobertura de arcilla gris o café, cuyo espesor varía desde 5 a 10 metros aproximadamente, como lo atestiguan, los registros litológicos provenientes de las perforaciones realizadas en el área.

Los sedimentos que se encuentran en la zona provienen de la Cordillera Occidental, los cuales han sido transportados por los ríos de la zona, y posteriormente acumulados en las márgenes de éstos, actualmente éstos procesos continúan actuando siendo los responsables los ríos Boliche y Culebra,

Estos sedimentos de origen continental están constituidos mayormente por limos y arenas, ya que la zona se encuentra casi en la desembocadura de el río Taura, por lo que los ríos transportan los materiales detríticos principalmente en suspensión debido a su poca energía.

2.4. Geomorfología

La evolución geomorfológica de el área de la Cuenca Baja del Guayas (entre los ríos Babahoyo y Cañar) ha sido determinada principalmente por la dinámica fluvial. Las acumulaciones fluviales están distribuidas en dos grandes conjuntos o paisajes: la planicie de piedemonte o zona de acumulación de materiales detríticos aluvionales y la llanura aluvial de inundación.

La planicie de piedemonte está determinada por la unión sucesiva lateral de varios abanicos o conos de explayamientos, cuya morfogénesis es función de varios factores. En primer lugar, la magnitud de la cuenca de erosión, que corresponde a los ríos localizados en la zona noreste de la cuenca (Chanchán, Chimbo, Chague). En cambio, en la parte sur-oriental, los explayamientos son más pequeños, puesto que los ríos y quebradas que bajan de las montañas tienen un recorrido muy corto. Un segundo factor es el medio aluvial del río Babahoyo y el prelitoral en el Golfo de Guayaquil.

El material de los abanicos presenta características comunes: se trata de un material de granulometría gruesa, con texturas variables por efecto de la sucesión de estratos mezclados con abundantes piedras, gravas y gravillas bastante heterogéneas y subredondeadas.

La llanura de inundación no es un cauce ni tiene límites precisos, ya que corresponde a un fenómeno hidrológico sin acción morfogenética. La llanura se caracteriza por formas de acumulación de material más fino que los de los abanicos de explayamiento; cuando el río se sale de su cauce y corre por diferentes partes del cauce mayor, deposita su carga, por lo que la inundación es turbulenta; el agua causa tanta erosión como sedimentación y el patrón resultante de los suelos es complejo en diferentes grados.

El área de estudio se trata de un relieve llano, de pendiente muy baja y está inscrito en la típica llanura de inundación de los grandes valles fluviales (Río Guayas), debido a este factor es susceptible de las inundaciones periódicas que se dan en el sector, otro factor es que en sus proximidades se descargan grandes caudales provenientes del drenaje de las cuencas hidrográficas aledañas.

Regionalmente el paisaje natural está dominado por la vasta llanura aluvial desarrollada por el sistema hidrográfico existente, que hacia el Sureste se ve interrumpido por un sistema montañoso de baja altura, conformado por los Cerros de Taura y Masvale.

2.5. Exploraciones hidrogeológicas

En el estudio de las aguas subterráneas se utilizan los métodos de prospección y métodos de exploración. Entre los más comunes (Castany 1975) se encuentran:

- El inventario de los recursos hídricos
- La fotogeología
- La prospección geofísica
- Los sondeos o perforaciones
- Los registros litológicos
- La testificación eléctrica en los pozos

En el presente estudio se utilizó la prospección geofísica, perforaciones o sondeos, registros litológicos, y testificación eléctrica en los pozos. A continuación se describen estos métodos y se presentan los datos obtenidos en el estudio.

2.5.1. Perforaciones

O sondeo, es un orificio circular de pequeño diámetro, generalmente vertical, abierto en el subsuelo con ayuda de medios mecánicos apropiados (Castany 1975). Aunque en la actualidad también se realizan sondeos inclinados u horizontales, por lo que no se debe tomar la verticalidad de un sondeo como algo absoluto. El diámetro del taladro varía desde

algunos centímetros hasta 1 metro o inclusive más. En el presente caso los pozos no sobrepasan los 100 metros debido a que el acuífero explotable se encuentra a profundidades inferiores a esa dimensión.

Las perforaciones van acompañadas del estudio hidrogeológico, con el que se determina:

- El caudal explotable
- Las características del acuífero: físicas (granulometría), potencia, profundidad del acuífero, nivel estático y dinámico.

Entonces dependiendo de esos datos se fijan las características técnicas del sondeo, esto es, entubados y filtros que sirven para mantener las paredes del orificio. La parte captante está rodeada por un empaque filtrante de grava obtenido por desarrollo artificial o natural.

En la zona de estudio se localizaron 16 pozos perforados principalmente para camaroneras que utilizan el agua para el llenado de sus piscinas. Se obtuvieron la mayor cantidad de datos posibles de los pozos, con los que se realizó el presente

trabajo. A continuación se presenta la TABLA 1 con los nombres de los pozos y su ubicación en coordenadas UTM.

TABLA 1

Ubicación de los pozos

Pozos	x	y
P1	631652	9752348
P2	637719	9747895
P3	638251	9747495
P4	642452	9749353
P5	642753	9757561
P6	646006	9746397
P7	646920	9745962
P8	649971	9753042
P9	650775	9751321
P10	652351	9755495
P11	655291	9750915
P12	655489	9753121
P13	656281	9750885
P14	657508	9750851
P15	658789	9754610
P16	661858	9757218

2.5.2. Registros litológicos

Dado el elevado costo de una perforación, es indispensable obtener, interpretar y conservar una documentación lo más completa posible, En esta parte se hace referencia a la toma de muestras utilizadas principalmente para la confección de un registro litológico.

Las muestras de rocas son de dos tipos según el método de obtención:

- los residuos de la perforación o ripios
- los testigos

En el presente caso se tienen datos de los residuos o ripios debido a que el método empleado para la perforación fue de rotación, en el que se toman muestras a intervalos regulares, inmediatamente a la salida de la parte superior del entubado. La cota de perforación se marca y se anota en la etiqueta.

Los residuos se lavan con agua sobre un tamiz, teniendo cuidado en las muestras arcillosas de no perder toda la fracción fina. Luego se secan y se colocan en cubetas, cajas, bolsas o sacos de tela o de plástico, con una etiqueta de identificación que lleva la fecha, hora y la cota, que es la del instrumento en el momento de la toma y el nombre del sondeo. Los resultados de los estudios de las muestras permiten construir el corte. Tiene la forma de columna vertical con una escala que varía según la profundidad del sondeo. Las formaciones se designan según su litología y se representan en el registro. Cada nivel se representa en su respectiva cota.

Entre los pozos estudiados se obtuvieron datos de 6 registros litológicos, con los cuales se construyó las respectivas columnas, utilizando el programa Rockworks 99 (Figuras 2.1 – 2.6) las cuales están representadas a continuación con su respectiva escala hacia la izquierda en metros.

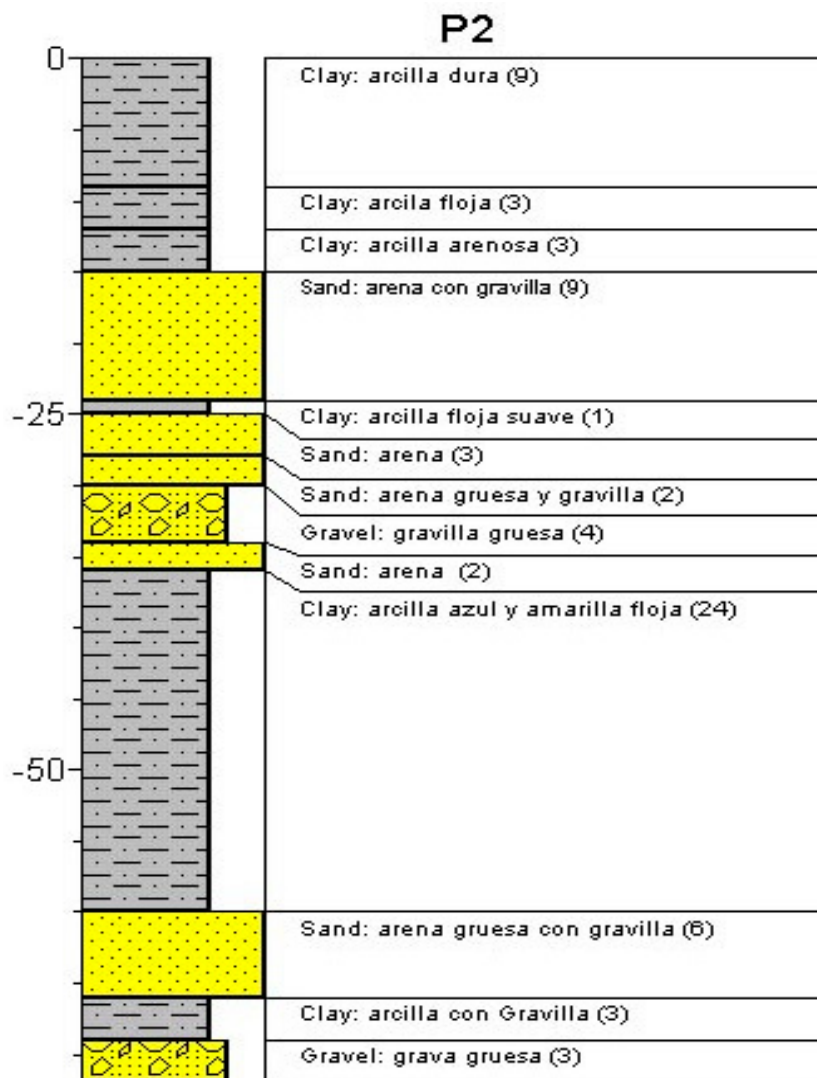


Figura 2.1. Columna Litológica Pozo P2

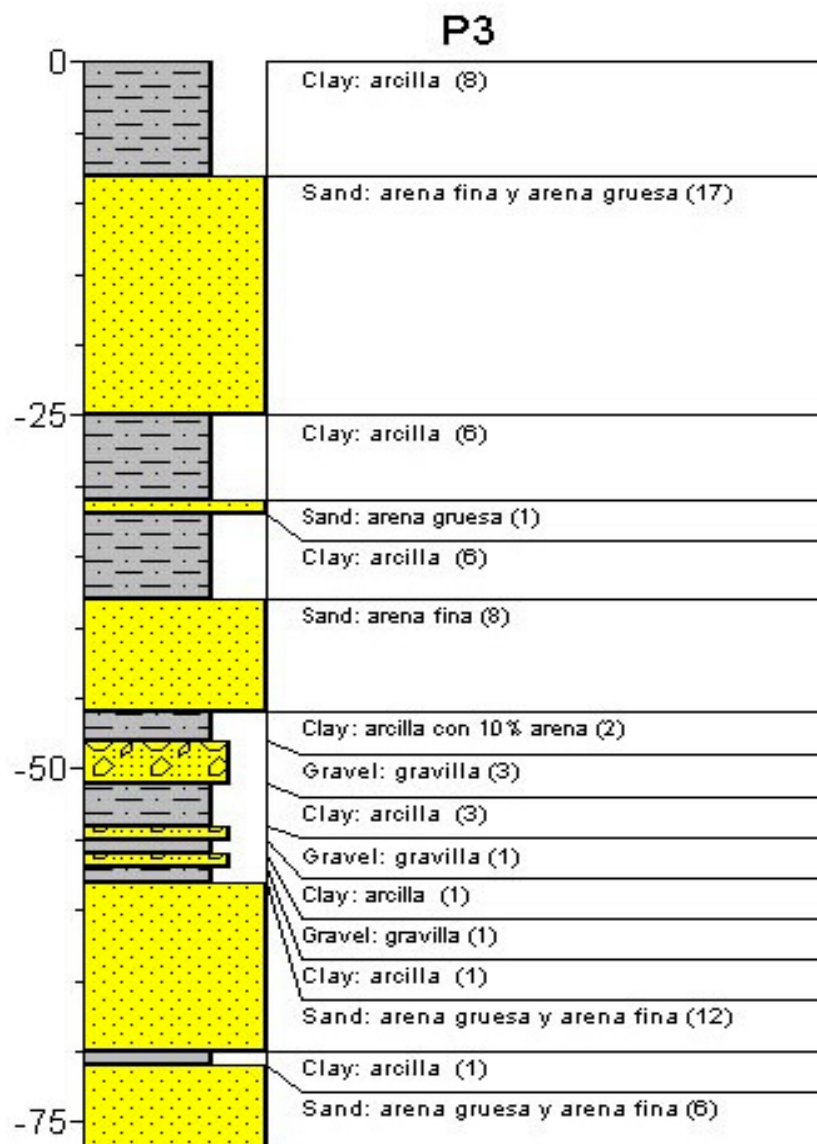


Figura 2.2. Columna Litológica Pozo P3

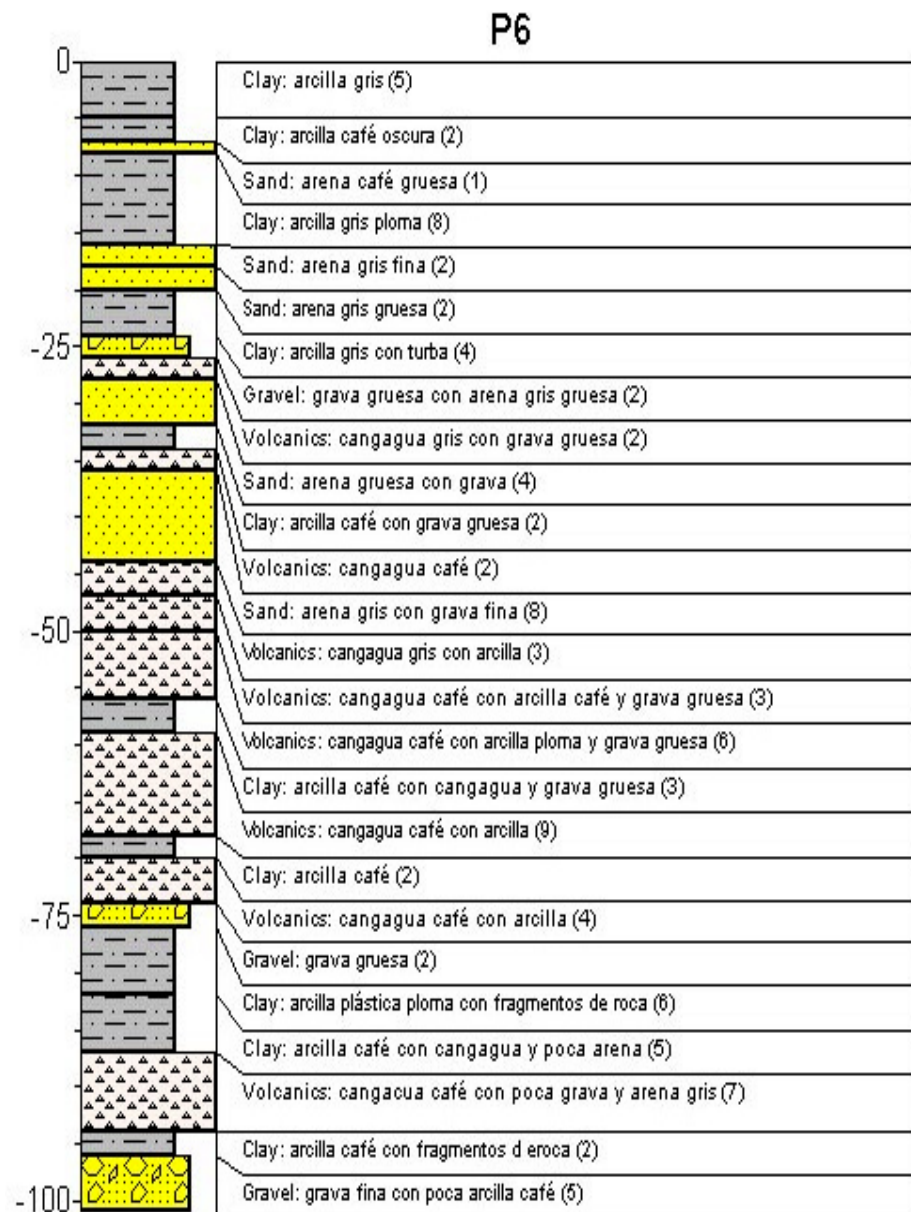


Figura 2.3. Columna Litológica Pozo P6

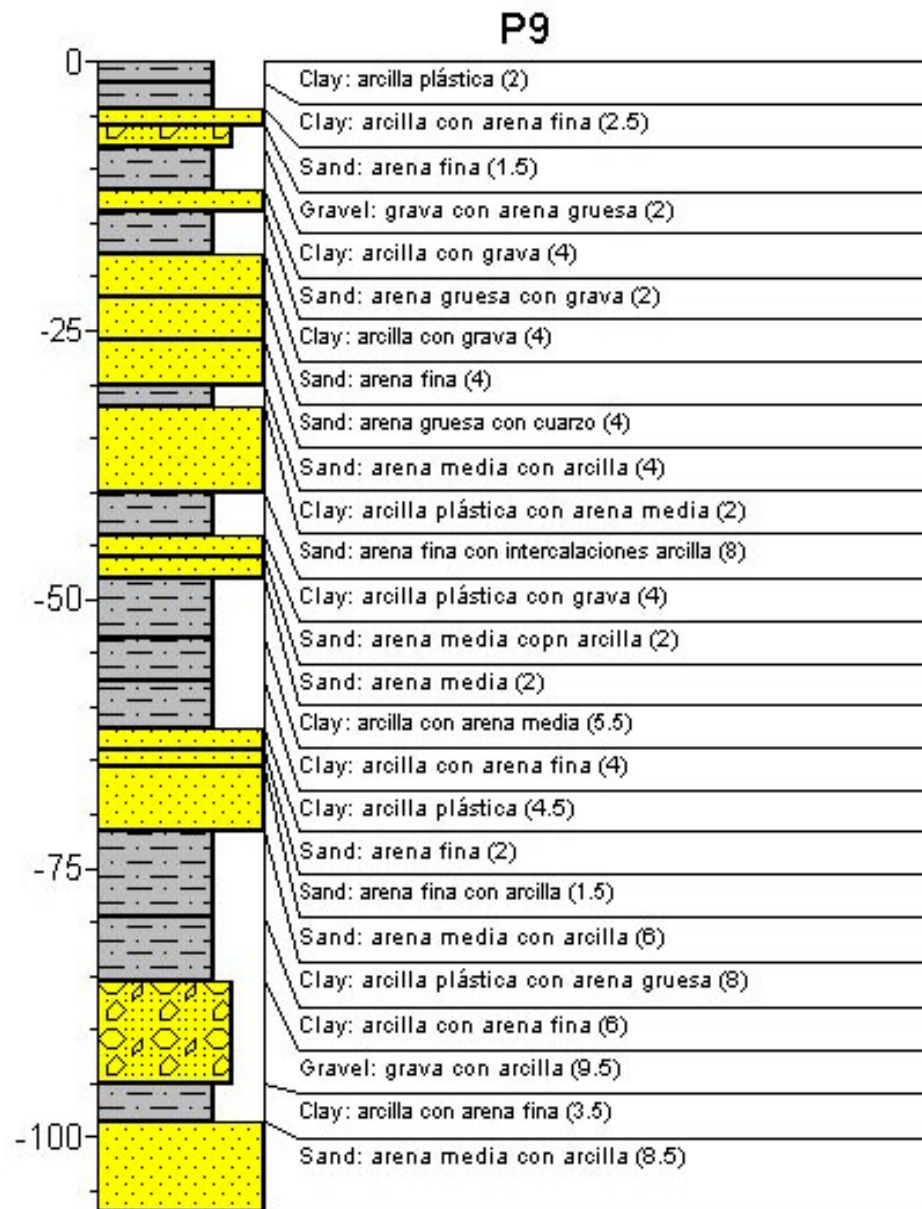


Figura 2.4. Columna Litológica Pozo P9

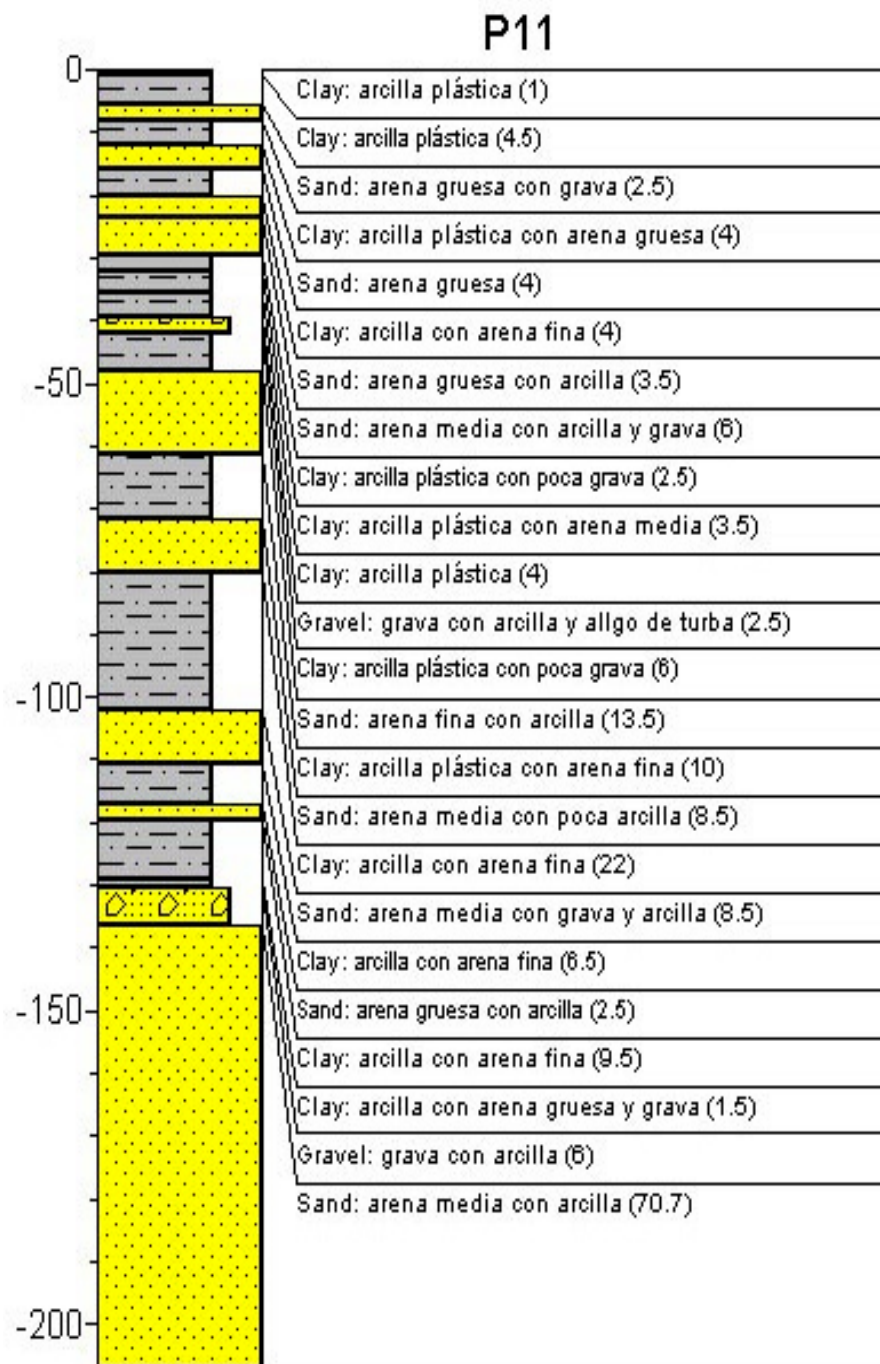


Figura 2.5. Columna Litológica Pozo P11

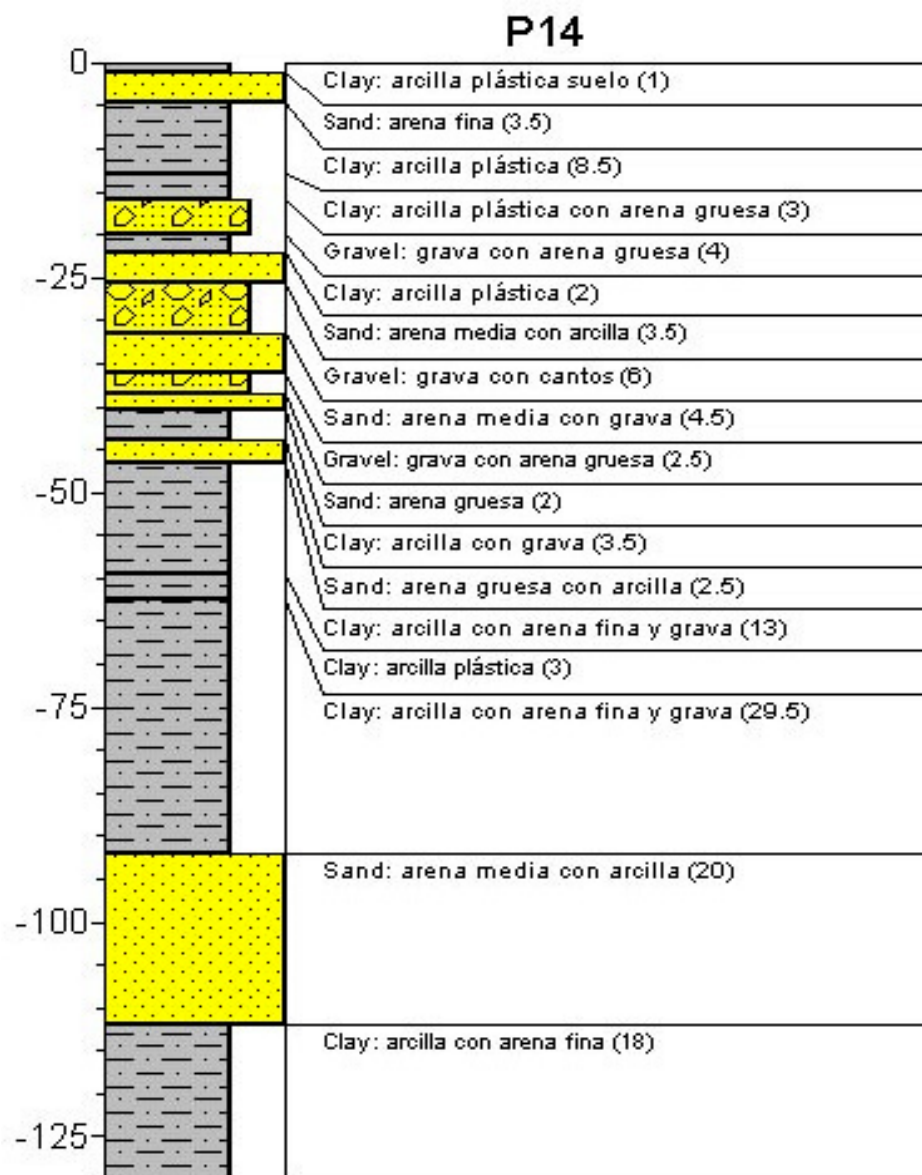


Figura 2.6. Columna Litológica Pozo P14

2.5.3. Testificación Eléctrica en Pozos

La testificación eléctrica de los sondeos tiene por objeto medir principalmente las variaciones de los parámetros eléctricos de los terrenos, como por ejemplo:

- la resistividad
- el potencial (o polarización) espontánea.

Esta operación se debe realizar en el agujero no entubado y lleno de lodo en reposo y homogéneo.

En la medida de la resistividad, obviamente el objetivo es medir la resistividad de los terrenos atravesados por el taladro, para luego determinar los diferentes tipos de material. En hidrogeología se utilizan preferentemente los registros convencionales de resistividad, que son: resistividad normal larga, la resistividad normal corta, la resistividad lateral. En los perfiles de resistividad, se envía corriente a la formación por medio de unos electrodos, y con otros dos electrodos distintos se miden los potenciales eléctricos. Las diagráafas de resistividad permiten reconocer límites litológicos, zonas permeables, zonas no permeables y establecer criterios sobre la conductividad.

Se realiza la medida de Potencial Espontáneo para medir la diferencia de potencial entre un electrodo móvil en el pozo (que se mueve en profundidad) y otro fijo en superficie.

Se utiliza para detectar capas permeables, ubicar límites entre capas, reconocer la línea de las arcillas, correlacionar las capas, determinar la resistividad del agua de formación y en el presente estudio para la identificación de la intrusión salina.

El Potencial Espontáneo se debe a las fuerzas electromotrices que tienen su origen en los contactos de los medios de naturaleza diferentes. En un pozo las capas arcillosas y/o margosas tienen el mismo valor de autopotencial, lo que permite definir en un registro la línea base o línea de las arcillas, y a partir de estas determinar las deflexiones correspondientes a las formaciones permeables.

En los pozos en la zona de estudio se han realizado dos Testificaciones Eléctricas, midiendo la Resistividad y el Potencial Espontáneo, a continuación se presentan dichos registros eléctricos; los cuales fueron representados utilizando el software Rockworks 99 con su respectiva escala hacia la izquierda en metros.

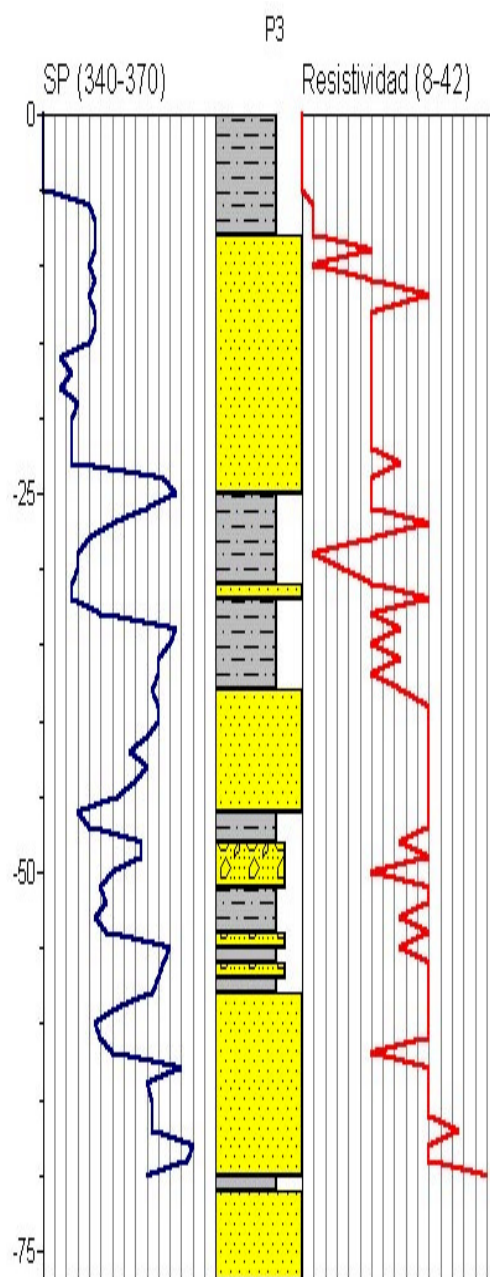


Figura 2.7. Registros Eléctricos (SP y Resistividad) Pozo P3

Testificación eléctrica Pozo P3

Partiendo de los registros eléctricos de Potencial Espontáneo (SP) y Resistividad Larga, (Figura 2.7), se realizó un análisis del que se pudo deducir que existen varias zonas, con características propias dependiendo de su naturaleza. Al inicio se pudo apreciar una capa de cobertura superficial de arcilla hasta una profundidad de 8 metros. Desde los 8 m. hasta los 25 m. se encuentra una primera zona compuesta mayormente de materiales permeables, como arenas de diferente granulometría, en esta zona se aprecia una resistividad baja, lo que indica que éstos materiales se encuentran saturados con agua salobre. Desde los 25 m. hasta los 40. se localiza una segunda zona, en la cual se encuentran alternando materiales permeables, como arenas de distinta granulometría, con estratos impermeables con predominio de arcillas, en estos acuíferos también se aprecia la presencia de agua con una concentración de sales importante. La tercera zona desde los 40 m. hasta los 70 m. presenta igualmente alternancia de materiales permeables e impermeables, con acuíferos constituidos por grava y arenas de diferente granulometría. Las

aguas de esta zona posee una cantidad importante de sales disueltas.

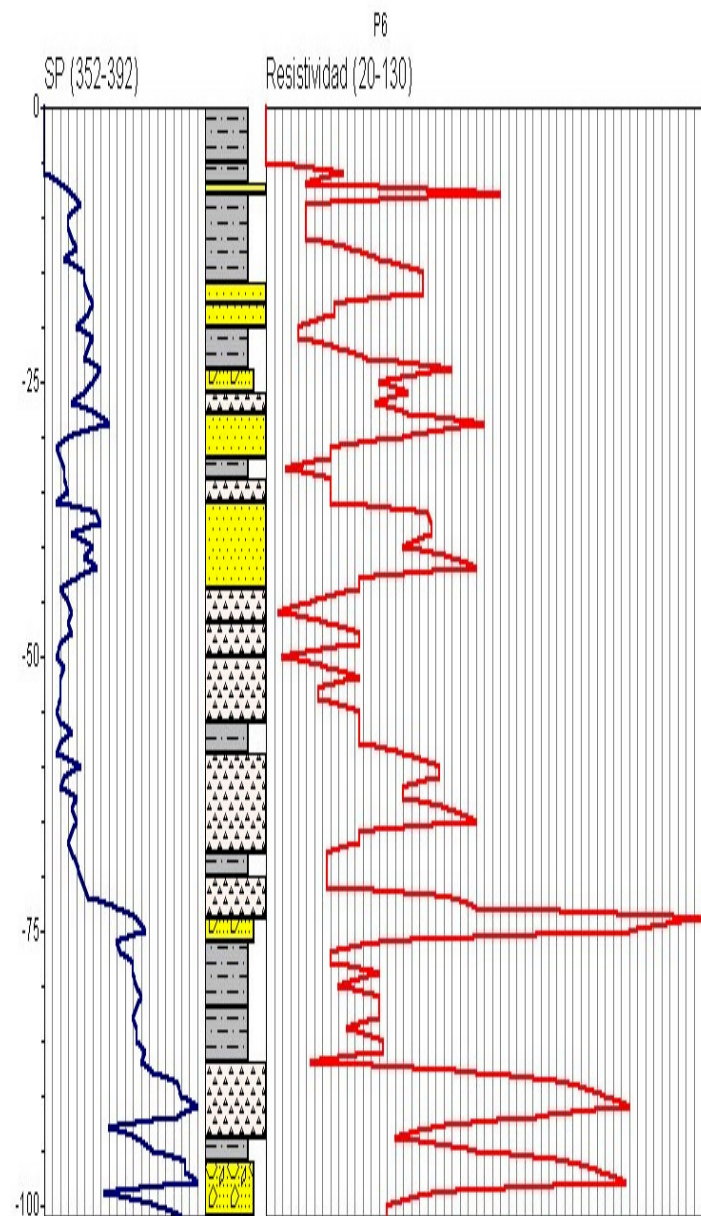


Figura 2.8. Registros Eléctricos (SP y Resistividad) Pozo P6

Testificación eléctrica Pozo P6

De los análisis de los registros eléctricos de Potencial Espontáneo (SP) y Resistividad Larga, (Figura 2.8), se pudo deducir que existen varias zonas bien definidas; así tenemos que hasta los 27 metros se define la primera zona, en la cual se observa un predominio de materiales arcillosos y acuíferos someros con presencia de agua un tanto salobre; desde los 27 m. hasta los 70, se localiza la segunda zona, en la que se encuentran alternando materiales permeables, como arenas de diferente granulometría y gravas con estratos impermeables compuestos de materiales arcillosos. En esta zona se encuentran acuíferos de agua dulce. Finalmente desde los 70 m. hasta los 101 m. se encuentra una zona que presenta al igual que la segunda, alternancia de materiales permeables, junto a materiales impermeables arcillosos, y los acuíferos están conformados principalmente de gravas y arenas gruesas, de igual forma que la zona superior el agua de estos acuíferos es dulce.

CAPITULO 3

3. GENERALIDADES DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS

Los Métodos de Exploración eléctrica, estudian por medio de mediciones efectuadas en la superficie, la distribución en profundidad de las siguientes magnitudes electromagnéticas: La permeabilidad magnética, la constante dieléctrica y la resistividad. De todas ellas y hasta ahora, es casi exclusivamente la resistividad la magnitud cuya distribución se estudia en el subsuelo.

Existe un criterio muy importante que clasifica los métodos según el origen del campo electromagnético que se estudia, ya sea natural o artificial (Schlumberger 1932). Según este criterio, se presentan los siguientes métodos:

Métodos de campo natural:

- Método del Potencial Espontáneo
- Método de las Corrientes Telúricas

Métodos de Campo Artificial:

- Método de las líneas Equipotenciales
- Método de las Relaciones de Caída de Potencial
- Método de las Resistividades
- Método de la Polarización Inducida

De todos éstos métodos, el de resistividades es el de mayor uso y éxito en la búsqueda de agua subterráneas, razón por la cual el presente trabajo se basa en dicho método.

3.1. Teoría de la Resistividad

La medida de resistividad de un terreno, es la medida de su contenido de agua y de su mineralización (conductividad electrolítica). La combinación de factores tales como porosidad, grado de saturación y tenor en sales del agua de formación individualizan eléctricamente una formación (Kalenov 1987).

La resistividad de un material es definida como la resistencia existente entre las caras opuestas de una unidad cúbica de ese material.

$$\rho = R \frac{s}{l} \quad (3.1)$$

donde:

ρ = Resistividad del material en $\Omega m^2 / m \Rightarrow \Omega m$

R = Resistencia en Ω .

l = Longitud en m.

s = Sección transversal en m^2 .

Otras unidades utilizadas de ρ son Ω -cm y Ω -pie

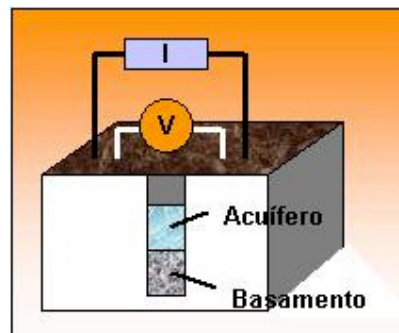


Figura 3.1 Esquema de Sondeo Eléctrico

El método de resistividades se basa en el siguiente principio: Se considera un cuerpo sólido muy grande (semi-infinito) con una resistividad uniforme, ρ . Cuatro electrodos son colocados dentro del material en las posiciones A, B, M, y N (Figura 3.2). Una batería o generador eléctrico va conectado a los electrodos exteriores

(posiciones A y B) y enviará una corriente eléctrica alterna de 20 a 25 c.p.s. o preferiblemente continua, I , dentro del material que presenta cierta resistencia, un gradiente de potencial, V , es desarrollado entre dos puntos cualesquiera del material. Este gradiente de potencial es medido por un voltímetro o potenciómetro, colocado en los electrodos interiores (posiciones M y N).

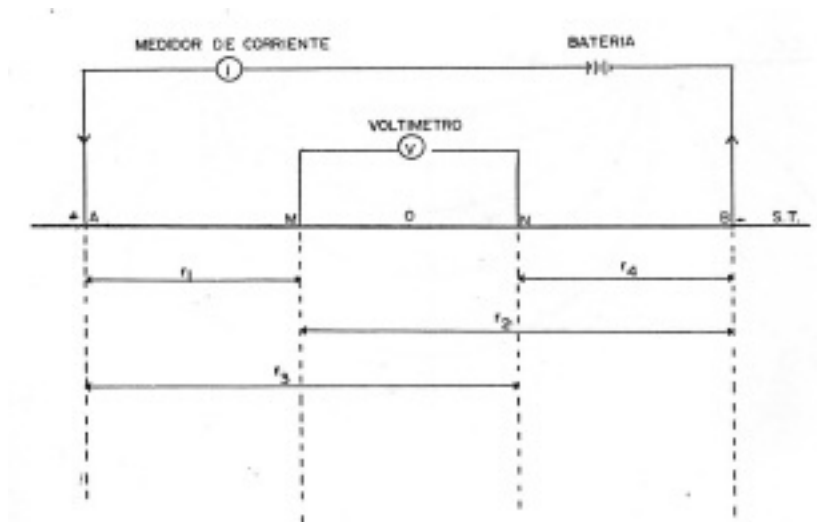


FIGURA 3.2. Diagrama esquemático del dispositivo de resistividad

Como se puede observar los instrumentos citados miden la relación V/I , por lo que se concluye que el método de resistividades es una aplicación en la práctica de la Ley de Ohm.

Dentro del terreno la corriente fluye tanto vertical como horizontalmente. Si el terreno presenta un ρ uniforme, se

desarrollarán superficies equipotenciales que son semiesféricas concéntricas (Figura 3.3).

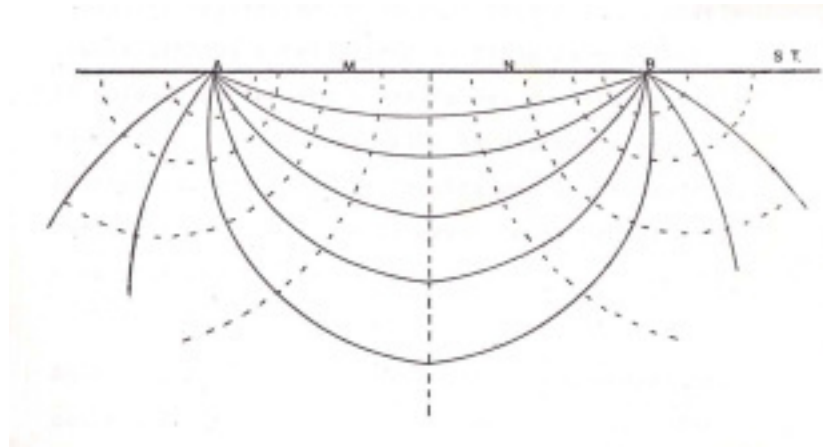


FIGURA 3.3. Patrón de flujo de corriente (líneas llenas) y el patrón de superficies equipotenciales (líneas entrecortadas).

Se comprueba que :

- La profundidad de penetración de las líneas de corriente aumenta de los electrodos exteriores hacia el centro de AB (Centro de Simetría O entre éstos electrodos).
- En la zona situada en el centro de AB, las equipotenciales son prácticamente rectas perpendiculares a AB.

Cualquier desviación de la uniformidad de ρ , podría causar cambios en el patrón de flujo de corriente. El volumen de terreno a través del cual la corriente circula, es proporcional a la distancia entre los cuatro

electrodos. Esto implica que la profundidad del terreno incluido en la medición es proporcional a la distancia entre los electrodos.

Aplicando la Ley de Ohm al espacio comprendido entre dos equipotenciales entre las que existe una diferencia de potencial, se tiene:

$$V = \frac{I}{R} \quad (3.2)$$

(3.1) en (3.2)

$$V = I \frac{\rho * l}{s}$$

En el caso de esferas concéntricas limitadas por la superficie del terreno, se reemplaza:

$$l = r$$

$$s = 2\pi r^2$$

en la ecuación (3.2)

$$V = I \frac{\rho}{2\pi * r} \quad (3.3)$$

En base a la figura 3.2, el potencial resultante en el electrodo M es:

$$V_M = V_{AM} - V_{MB}$$

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi r_1} - \frac{I\rho}{2\pi r_2}$$

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

De manera similar, el potencial en el electrodo N es :

$$V_N = V_{AN} - V_{NB}$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi r_3} - \frac{I\rho}{2\pi r_4}$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)$$

La diferencia de potencial, ΔV , medida por el voltímetro entre los electrodos M y N es:

$$\Delta V = V_M - V_N$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)$$

Despejando ρ , se tiene:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} * \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)} \quad (3.4)$$

La igualdad (3.4) es la ecuación fundamental del Método de Resistividades. Con:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)}$$

se tiene:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3.5)$$

Las unidades comúnmente empleadas son: ρ en $\Omega\cdot m$, ΔV en mV, I en mA y K en m. El factor K solo depende de la posición relativa de los cuatro electrodos y se llama Factor Geométrico.

Con la ecuación (3.4) es posible determinar la resistencia verdadera de un terreno homogéneo. Si el terreno no es homogéneo, a partir de los valores de K , V e I se obtiene un valor ρ_a llamado Resistividad Aparente, que está ligado por complejas relaciones a las resistividades verdaderas y espesores de todas las capas englobadas

por el dispositivo AMNB de medida. La Resistividad Aparente ρ_a se define como “ la resistividad verdadera de un terreno imaginario homogéneo e isótropo, equivalente al terreno real heterogéneo”.

Dependiendo de que el objetivo de la investigación sea el estudio de las variaciones en profundidad o laterales de ρ_a , se distinguen dos técnica: Sondeos Eléctricos y Calicatas o Perfiles Eléctricos. En el presente estudio en que se está buscando el horizonte acuífero se emplearon los Sondeos Eléctricos.

3.2. Tipos de Dispositivo

Existen diversos tipos de dispositivos, lineares y simétricos con respecto a O (centro de simetría del sondeo), en todos ellos los electrodos de corriente generalmente colocados en la parte más exterior, y los de voltaje en el interior. Los más comunes, son los dispositivos de Wenner y Schlumberger, en el presente estudio, se utilizó el dispositivo Schlumberger, debido a que en el trabajo de campo exige menos tiempo y número de hombres, que implica menos costo y probabilidad de cometer errores, pero lo más importante es que nos proporciona curvas de campo más precisas. A continuación paso a describir el dispositivo utilizado.

Dispositivo Cuadripolo Schlumberger:

Es un dispositivo lineal, rectilíneo y simétrico. Este dispositivo usa cuatro electrodos que no se encuentran igualmente espaciados siendo el punto O el centro común de AB y MN (Figura 3.4).

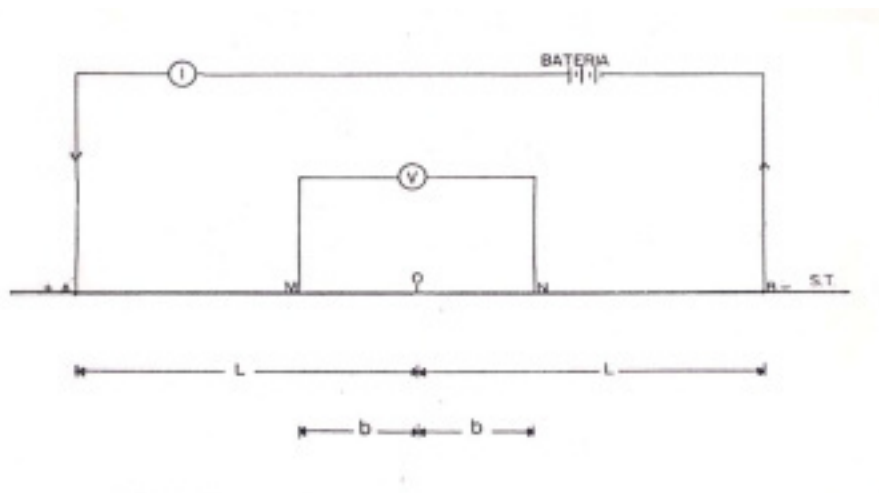


FIGURA 3.4. Esquema del dispositivo Schlumberger

Durante las mediciones , solo los electrodos exteriores cambian de posición; L cambia, pero MN se mantiene fijo. Cuando la diferencia de voltaje es insignificante, entonces se aumenta la distancia MN. La relación AB/MN varía dentro del rango 4 a 20.

Según Schlumberger, la profundidad teórica de investigación del sondeo alcanza un cuarto de la distancia AB, pero en realidad puede variar de $AB/2$ hasta $AB/10$ según las características del terreno.

Para este dispositivo, la ecuación (3.4) queda así:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} * \frac{1}{\left(\frac{1}{L-b} - \frac{1}{L+b}\right) - \left(\frac{1}{L+b} - \frac{1}{L-b}\right)}$$

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} * \frac{1}{\left(\frac{2}{L-b} - \frac{2}{L+b}\right)}$$

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} * \frac{1}{\frac{2(L+b) - 2(L-b)}{(L+b)(L-b)}}$$

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} * \frac{1}{\frac{4b}{L^2 - b^2}}$$

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} * \frac{L^2 - b^2}{4b}$$

$$\rho = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{L^2 - b^2}{b} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \mathbf{(3.6)}$$

El dispositivo Schlumberger es cada día más empleado, ya que por lo general entre dos medidas consecutivas solo se desplazan dos electrodos, lo que supone un ahorro de tiempo y de personal; y además , las perturbaciones debidas a heterogeneidades locales en

la proximidad de los electrodos MN o AB son limitadas y fácilmente comprobables, por lo que no supone ninguna dificultad la eliminación de su influencia.

3.3. Método de Interpretación

La finalidad de los métodos de interpretación es determinar la distribución espacial de las resistividades verdaderas en el subsuelo, partiendo de los datos de resistividad aparente obtenidos. (Figura 3.5)



Figura 3.5 Curva de campo de resistividad aparente vs Profundidad

El problema de la interpretación de un sondeo eléctrico es ambiguo. Por ello, se deben buscar soluciones válidas que armonicen con los datos geológicos disponibles.

Los Métodos de Resistividades se los ha clasificado en tres grupos: Empíricos, Analíticos y Matemáticos. Dentro de los Métodos

Analíticos, que es el método elegido para el presente estudio, la idea básica es la comparación de la curva de campo que se desea interpretar con las curvas teóricas de ciertos catálogos, hasta encontrar una de estas que coincida con la primera. Una característica esencial del procedimiento es la representación de las curvas en escala logarítmica, con lo que se consigue una reducción en el número de curvas teóricas necesarias. En efecto, dadas las propiedades de los gráficos logarítmicos, la multiplicación de todos los espesores o de todas las resistividades por una constante, no produce en la curva sino un desplazamiento sin cambio de forma ni de tamaño.

Este método es científico y aunque su precisión es limitada por ser gráfico, las inexactitudes que resultan de ello son inferiores a las debidas a errores experimentales. Por otra parte, se utiliza toda la curva, con lo que las perturbaciones debidas a efectos laterales o a que el subsuelo no cumple las condiciones teóricas de los medios estratificados, son advertidas inmediatamente.

Se empleó para la interpretación el software IPI2WIN, desarrollado por la Moscow State University, Geological Faculty, Department Of Geophysics. El cual permite realizar interpretaciones interactivas automatizadas y/o semi-automatizadas de Sondeos Eléctricos

Verticales a partir de datos obtenidos por cualquiera de los arreglos más populares utilizados en la prospección eléctrica.

IPI2Win está diseñado para la interpretación de las curvas de datos obtenidas de los sondeos eléctricos verticales a lo largo de un perfil. El objetivo principal es obtener un resultado geológico que nos permita definir las características del subsuelo en la zona estudiada. Además, debido a que es un proceso interactivo, el presente software brinda la posibilidad de elegir de una gama de soluciones, la que mejor se ajuste a la realidad, a partir de los datos geofísicos y geológicos.

3.4. Toma y Procesamiento de los datos de campo obtenidos en los sondeos eléctricos.

Se obtuvieron datos de 6 sondeos eléctricos, con el dispositivo Schlumberger. La abertura de los electrodos AB/2 utilizada con el dispositivo Schlumberger varió entre 100 y 200 metros.

Los sondeos han sido denominados con letras minúsculas, empezando con la letra "a" en el sondeo más cercano al río Guayas, continuando hacia el este con las letras sucesivas del alfabeto hasta el sondeo f que es el más alejado del río. La orientación predominante en los sondeos fue W-E.

Para las mediciones se utilizó el Equipo de Resistividad Eléctrica existente en la facultad, ABEM SAS-300 B, el cual permite tomar lecturas de resistencia directamente, lo que resultó muy ventajoso ya que ahorra tiempo, al no tener que realizar los cálculos. Las tablas de los datos y resultados obtenidas de los sondeos, se encuentran en el **anexo A.**

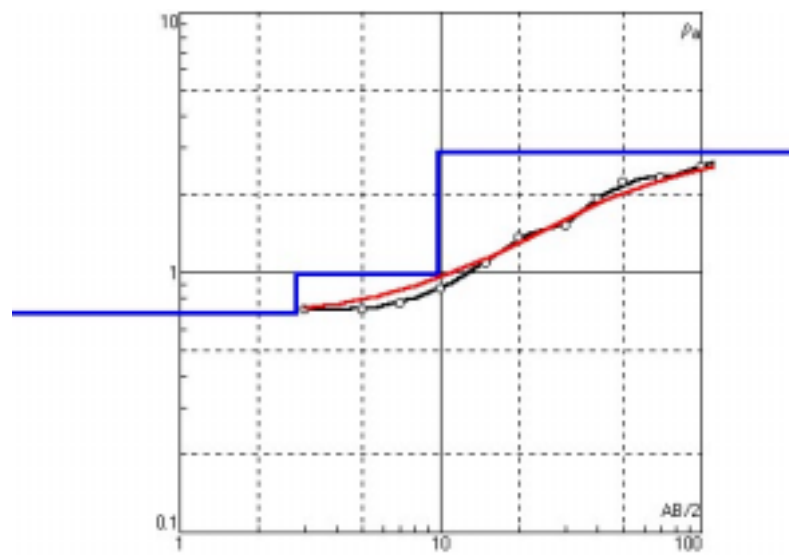
Del procesamiento de los datos con el software IPI2Win se obtuvieron los modelos, que están representados por las curvas de datos (en negro), acompañadas de la curva teórica (en rojo), y los parámetros del modelo para el sondeo estudiado, es decir las resistividades verdaderas y espesores vienen dados por una línea en azul, indicándose además en las tablas adjuntas: la resistividad verdadera ρ , el espesor h y el error, éste representa la diferencia relativa entre la curva teórica y la curva de campo de resistividad aparente. A continuación se presentan las curvas interpretadas.

TABLA 2

Ubicación de Sondeos Eléctricos Verticales

Sondeos	x	y
a	637419	9747791
b	637901	9747550
c	638462	9747309
d	645599	9746313
e	646193	9746286
f	646646	9745974

Sondeo a



N	ρ	h	d	Alt
1	0.7	2.8	2.8	-2.8
2	0.99	7	9.8	-9.8
3	2.9			

Figura 3.6. Sondeo a

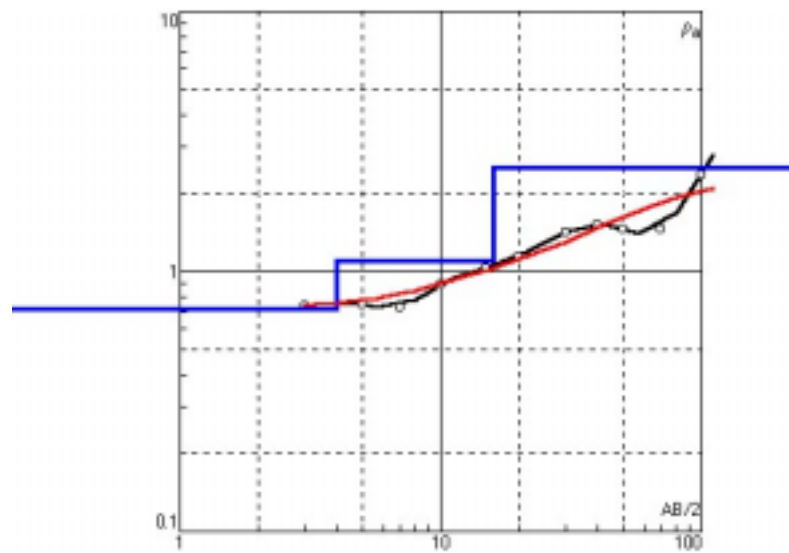
Sondeo a.

Este sondeo se lo realizó junto al pozo P3, ya que la litología de este pozo es conocida, presentada anteriormente. La abertura máxima AB/2 fue de 100 m.

Derivado de la comparación y análisis de las curvas obtenidas con el software IPI2Win (Figura 3.6) se obtuvo el siguiente modelo: Capa de suelo de cobertura superficial de ρ igual a $0.7 \Omega\text{-m}$ hasta una profundidad de 2.8 m. Sigue una capa de suelos superficiales arcillosos salobres de ρ igual a 0.99 y un espesor de 7 m. Es decir hasta una profundidad de 9.8 m. Continúa una capa de lodos, limos, arcillas y arenas de ρ igual a $2.9 \Omega\text{-m}$.

Debido a que en este último tramo existe una tendencia conductiva mayor de la que se presentaría si se tratara de depósitos aluviales saturados con agua dulce, se infiere que el valor de resistividad calculado, está afectado por una mayor concentración de sales en los estratos acuíferos, debido a los efectos ocasionados por una intrusión salina, de las aguas del estuario del Río Guayas.

Sondeo b



N	ρ	h	d	Alt
1	0.72	4	4	-4
2	1.1	12	16	-16
3	2.5			

Figura 3.7. Sondeo b

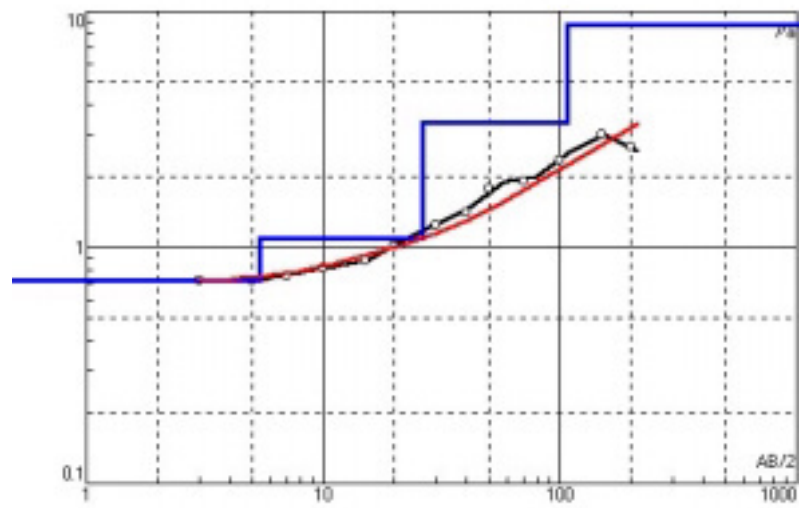
Sondeo b

Este sondeo se lo realizó entre los pozos P2 y P3. La abertura máxima de AB/2 fue de 100 m.

De la comparación de las curvas obtenidas mediante el software IPI2Win (Figura 3.7) se obtuvo el siguiente modelo: Capa de suelo de cobertura superficial de ρ igual a $0.72 \Omega\text{-m}$ hasta una profundidad de 4 m. Sigue una capa de suelos superficiales arcillosos salobres de ρ igual a 1.1 y un espesor de 12 m. Es decir hasta una profundidad de 16 m. Continúa una capa de lodos, limos, arcillas y arenas de ρ igual a $2.5 \Omega\text{-m}$.

Debido a que en este último tramo al igual que en el anterior sondeo, existe una tendencia conductiva mayor de la que se presentaría si se tratara de depósitos aluviales saturados con agua dulce, se infiere que el valor de resistividad calculado, está afectado por una mayor concentración de sales en los estratos acuíferos, debido a los efectos ocasionados por una intrusión salina, de las aguas del estuario del Río Guayas.

Sondeo c



N	ρ	h	d	Alt
1	0.72	5.4	5.4	-5.4
2	1.1	21	26.4	-26.4
3	3.4	82	108	-108.4
4	8.8			

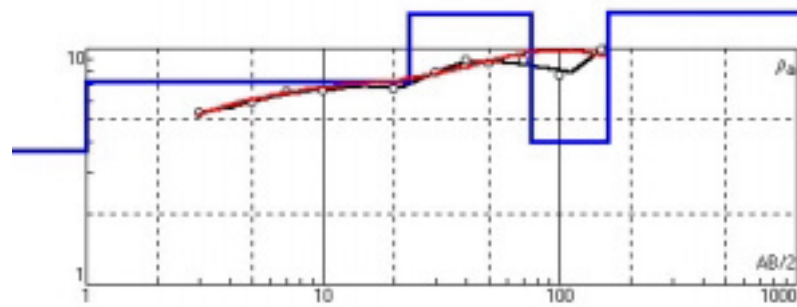
Figura 3.8. Sondeo c

Sondeo c

Este sondeo se lo realizó cercano al pozo P3, con una abertura máxima de AB/2 igual a 200 metros.

De la comparación de las curvas obtenidas con el software IPI2Win (Figura 3.8) se obtuvo el siguiente modelo: Capa de suelo de cobertura superficial de ρ igual a $0.72 \Omega\text{-m}$ hasta una profundidad de 5.4 m. Sigue una capa de suelos superficiales arcillosos salobres de ρ igual a 1.1 con un espesor de 21 m. Es decir hasta una profundidad de 26.4 m. Continúa una capa de lodos, limos, arcillas y arenas de ρ igual a $3.4 \Omega\text{-m}$. Debido a los efectos de la intrusión salina, detectada en los sondeos a y b, que produce una mayor concentración de sales en las aguas almacenadas en esta capa. En este sondeo se localiza la base de esta capa a una profundidad de 100 m. Con un espesor de 80 m. aproximadamente. Luego se encuentra un complejo semi-resistivo compuesto de lodos, limos, arcillas, materiales finos que se encuentran predominando, con un valor de resistividad verdadero de $8.8 \Omega\text{-m}$. Este valor relativamente alto de resistividad podría ser debido a que este sondeo se encuentra a una mayor distancia del Río Guayas, por lo que el efecto de la intrusión salina tiende a debilitarse, en dirección W-E.

Sondeo d



N	ρ	h	d	Alt
1	3.7	1	1	-1
2	7.2	22	23	-23
3	14	53	76	-76
4	4	85	161	-161
5	14.2			

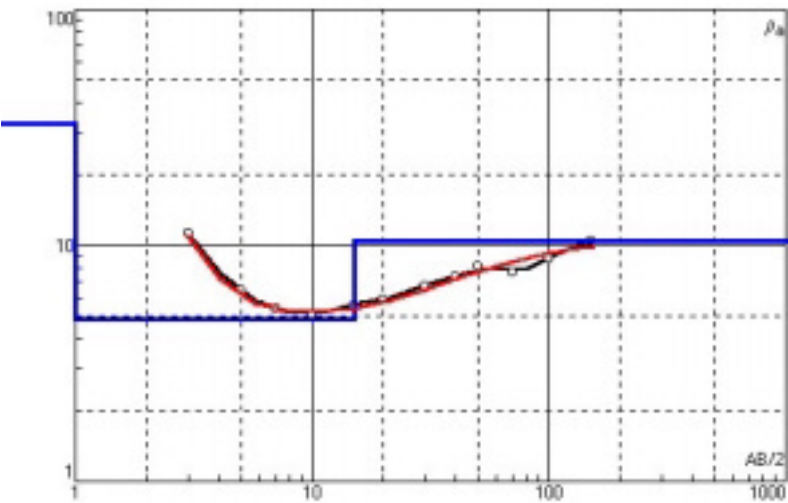
Figura 3.9. Sondeo d

Sondeo d

En este sondeo la abertura máxima AB/2 fue de 150 metros. En base a la comparación de las curvas y procesamiento de los datos de campo con el software IPI2Win, (Figura 3.9) se obtuvo el siguiente modelo: Suelos de cobertura superficial de ρ igual a 3.7 Ω -m hasta una profundidad de 1 m. Luego sigue una capa de suelos superficiales arcillosos de ρ igual a 7.2 Ω -m hasta los 23 m. de profundidad, es decir 22 m. de espesor. Continúa con un tramo de depósitos aluviales: lodos, limos, arcillas y arenas de ρ igual a 14 Ω -m, de este resultado de resistividad verdadera se puede inferir que se trata de un complejo semi-resistivo, los materiales detríticos están saturados con aguas de salinidades bajas, con un espesor de 53 m. Además en este mismo complejo se encontró a continuación una capa de ρ igual a 4.4 Ω -m. con un espesor aproximado de 80 m. Continúa con otro complejo de lodos, limos y arcillas con un valor de resistividad verdadero de 14.20 Ω -m. por la presencia de elementos finos como las arcillas presentes en el complejo. En el tramo 54 a 84 metros existe un horizonte conductivo, que en principio se pensó podría deberse a materiales permeables, saturados con aguas de mayor concentración de sales disueltas o en su defecto a la predominancia de materiales arcillosos. En base a los valores de

resistividades verdaderos calculados se puede inferir que las aguas de este complejo presentan salinidades bajas.

Sondeo e



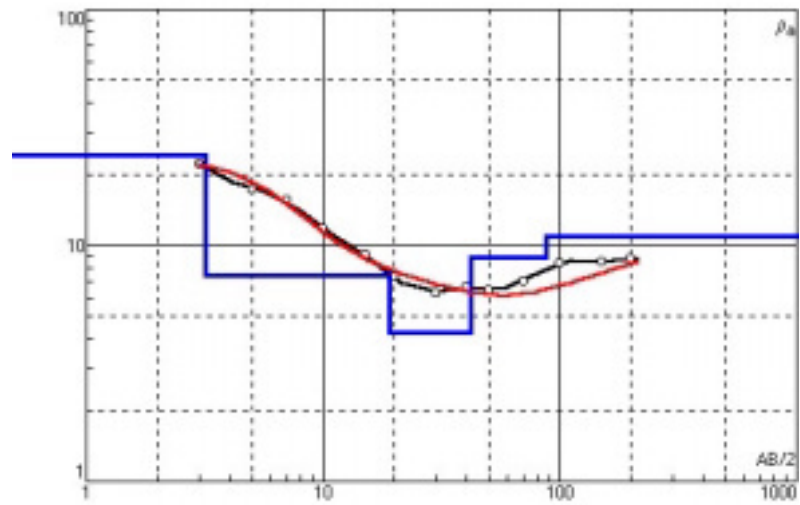
N	ρ	h	d	Alt
1	33	1	1	-1
2	4.9	14	15	-15
3	10.5			

Figura 3.10. Sondeo e

Sondeo e

Este sondeo la abertura máxima de $AB/2$ fue igual a 150 metros. En base a el procesamiento de los datos de campo con el software IPI2Win, (Figura 3.10) se obtuvo el siguiente modelo: Suelos de cobertura superficial de ρ igual a $33 \Omega\text{-m}$ hasta una profundidad de 1 m. Luego sigue una capa de suelos superficiales arcillosos de ρ igual a $4.9 \Omega\text{-m}$ hasta los 15 m. de profundidad, es decir 14 m. de espesor. Continúa con un tramo de depósitos aluviales: lodos, limos, arcillas y arenas de ρ igual a $10.5 \Omega\text{-m}$, de este resultado de resistividad verdadera se puede inferir que se trata de un complejo semi-resistivo, los materiales detríticos están saturados con aguas de salinidades bajas.

Sondeo f



N	ρ	h	d	Alt
1	24	3.2	3.2	-3.2
2	7.5	16	19.2	-19.2
3	4.3	23	42.2	-42.2
4	8.9	46	88.2	-88.2
5	10.9			

Figura 3.11. Sondeo f

Sondeo f

En este sondeo la abertura máxima de AB/2 fue de 200 metros. Con los datos de campo se procedió a realizar el procesamiento de los datos con el Software IPI2Win (Figura 3.11), se consiguió el modelo que presento a continuación: Suelos de cobertura superficial de ρ igual a 24 Ω -m hasta una profundidad de 3.2 m. Luego sigue una capa de suelos superficiales arcillosos de ρ igual a 7.5 Ω -m hasta los 19.2 m. de profundidad, es decir 16 m. de espesor. Además en este mismo complejo se encontró a continuación una capa de ρ igual a 4.3 Ω -m. con un espesor aproximado de 23 m. A continuación un tramo de depósitos aluviales: lodos, limos, arcillas y arenas de ρ igual a 8.9 Ω -m, de este resultado de resistividad verdadera se puede inferir que se trata de un complejo semi-resistivo, los materiales detríticos están saturados con aguas de salinidades bajas, con un espesor de 46 m. Continúa con otro complejo de lodos, limos y arcillas con un valor de resistividad verdadero de 10.9 Ω -m. por la presencia de elementos finos como las arcillas presentes en el complejo.

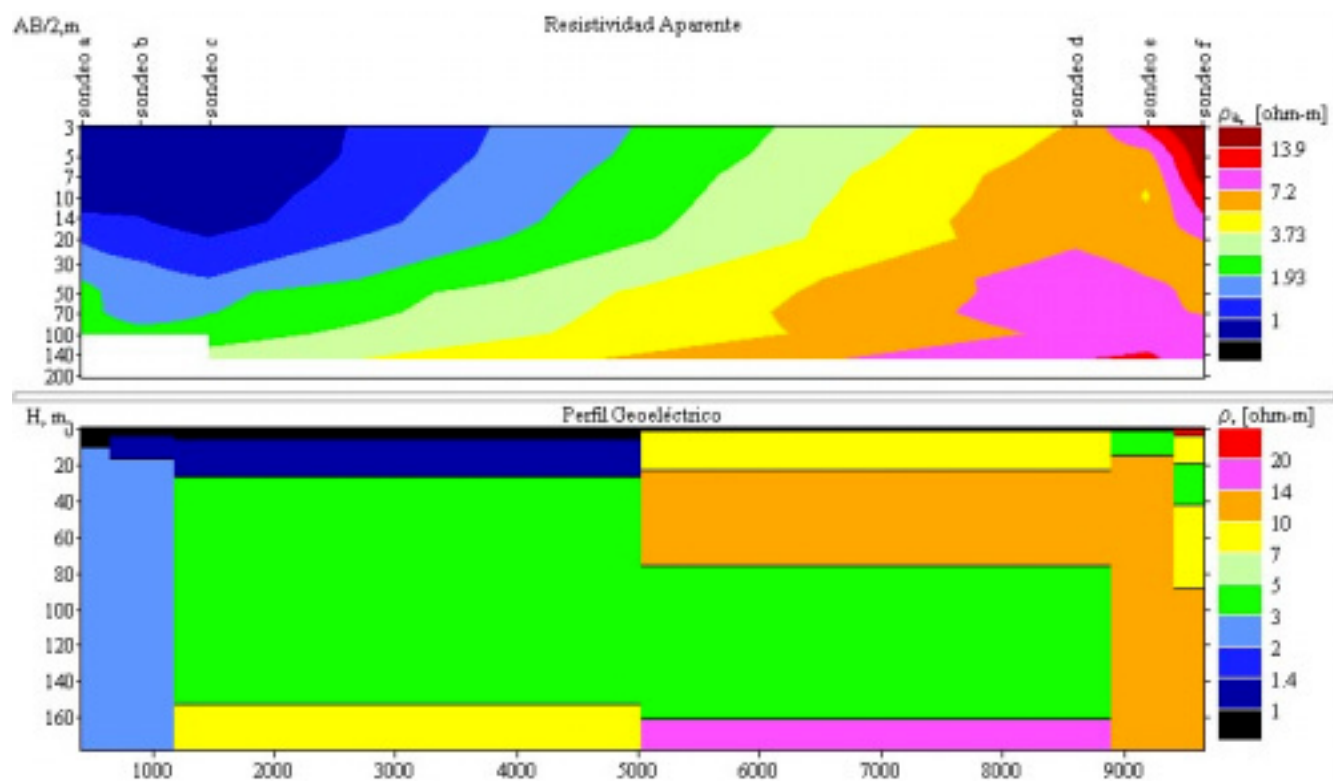


Figura 3.12. Corte Geoelectrico

Corte geoelectrico de la zona de estudio

Se realizó un corte geoelectrico utilizando el Software IPI2win (Figura 3.12), en base a los modelos de los 6 sondeos antes descritos. En este corte se presenta a un costado la escala de resistividades. Se pudo comprobar que la intrusión salina ha avanzado hasta la zona comprendida entre los pozos P3 y P6 (entre los sondeos c y d). Nótese que las resistividades disminuyen en dirección W-E, de una manera escalonada; desde los sondeos a, b y c en los cuales los valores de resistividad son bajos (intrusión salina presente) hasta alcanzar valores altos de resistividad en los sondeos d, e, y f (agua dulce), lo que indica que los materiales permeables de esta zona no se encuentran afectados por la intrusión salina.

CAPITULO 4

4. AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.1. Circulación del agua en el subsuelo

4.1.1. Ley de Darcy

El flujo de las aguas subterráneas obedece a la ley de Darcy, ésta ley es válida bajo las siguientes premisas (Castany 1975)

- Medio homogéneo e isótropo;
- Substrato impermeable horizontal;
- Flujo en régimen laminar.

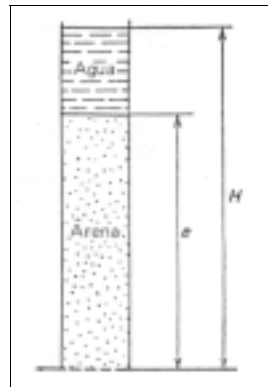


Figura 4.1. Experiencia de Darcy

El flujo se rige por la siguiente fórmula:

$$Q = kS \frac{H}{e} \quad (4.1)$$

Q, es el caudal de flujo, en m³/s;

H, la altura de carga del agua, en metros;

S, la superficie de la sección en m²;

k, un coeficiente de proporcionalidad, ligado a la naturaleza de la arena;

e, el espesor de la columna de arena en metros;

H/e, es la pérdida de carga por unidad de longitud, o gradiente hidráulico, i.

La fórmula 4.1 queda en función de i:

$$Q = kSi \quad (4.2)$$

La velocidad v, en la unidad de tiempo, es igual a:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (4.3)$$

La velocidad aparente del flujo v, de un hilo líquido, obedece pues a una ley lineal, de fórmula:

$$v = ki \quad (4.4)$$

donde:

v es la velocidad aparente de flujo o de percolación (velocidad referida a la sección total S) en cm/s;

k , un coeficiente de proporcionalidad (cm/s);

i , el gradiente hidráulico.

La velocidad v es una velocidad aparente ya que es el cociente del caudal Q por la superficie total S , comprendiendo los espacios vacíos y el material sólido.

4.1.2. Gradiente Hidráulico

El coeficiente hidráulico, o pérdida de carga por unidad de longitud, es una cifra sin dimensiones. Puede calcularse de diferentes modos, en función de los datos que se escojan (Castany 1975).

Cálculo del gradiente hidráulico por los niveles piezométricos.

En base a la Figura 4.2 (a) El gradiente hidráulico viene dado por la fórmula:

$$i = \frac{h}{L} \quad (4.5)$$

Sea h la diferencia entre los niveles piezométricos, $H_1 - H_2 = h$, y L , la distancia horizontal entre los piezómetros.

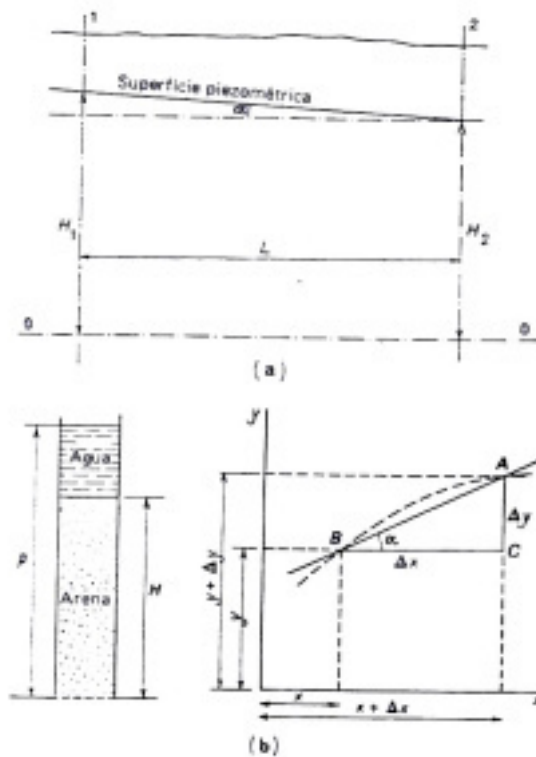


Figura 4.2. Cálculo del gradiente hidráulico

Si p es la presión del flujo, o carga bajo la cual se efectúa el flujo, y H la potencia del manto acuífero, tendremos:

$$i = \frac{p}{H} \quad (4.6)$$

Cálculo del gradiente hidráulico por la pendiente de la superficie piezométrica.

En base a la Figura 4.2. (b) observamos que el gradiente hidráulico i resulta ser:

$$i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4.7)$$

Cuando A se acerca a B, los valores Δx e Δy disminuyen, en el límite tendremos:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (4.8)$$

La derivada dy/dx caracteriza la pendiente de la recta AB:

$$i = \frac{dy}{dx} \quad (4.9)$$

El gradiente hidráulico es la derivada de la función de la curva que materializa la superficie piezométrica. Si reemplazamos la ordenada y por la potencia H de la capa acuífera, tenemos:

$$i = -\frac{dH}{dx} \quad (4.10)$$

$$i = -\frac{dh}{dL} \quad (4.11)$$

El signo negativo se debe a que dx aumenta en el sentido del desagüe mientras que H disminuye.

4.1.3. Permeabilidad

Debido a la existencia de dos coeficientes de permeabilidad, es preciso definir cada uno de ellos para una mejor comprensión del tema:

Coeficiente de permeabilidad de Darcy.

$$v = ki \quad (4.12)$$

Es un parámetro que tiene la dimensión de una velocidad (espacio/tiempo: LT^{-1}). La permeabilidad es la propiedad del material acuífero que consiste en transmitir el agua bajo presión. La Ley de Darcy se puede expresar también en función del caudal y de la sección de desagüe, mediante la ecuación homogénea:

$$Q = kSi \quad (4.13)$$

de donde:

$$k = \frac{Q}{Si} = \frac{Q}{Sdh / dL} \quad (4.14)$$

Podemos definir la permeabilidad como el volumen de agua gravífica que percola durante la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de una sección de terreno, bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad, a la temperatura de 20°C.

Coeficiente de permeabilidad intrínseca.

Si tenemos el coeficiente de permeabilidad intrínseca k_i , sabemos que:

$$k = k_i \frac{\gamma}{\mu} \quad (4.15)$$

donde γ es el peso específico del líquido, y μ la viscosidad. La viscosidad varía en función de la temperatura. El coeficiente de permeabilidad intrínseca es pues función de esta última.

En este caso la Ley de Darcy es:

$$Q = Sk_i \frac{\gamma}{\mu} i = Sk_i \frac{\gamma}{\mu} \frac{dh}{dL} \quad (4.16)$$

$$k_i = \frac{\mu Q / S}{\gamma i} \quad \text{o} \quad k_i = \frac{\mu Q / S}{\Delta p / L} \quad (4.17)$$

donde $\Delta p / L$ es la pérdida de carga.

El coeficiente de permeabilidad intrínseca tiene las dimensiones de una superficie (L^2). Se expresa en cm^2 o m^2 según el sistema que se esté utilizando.

Unidades de permeabilidad

Los hidrogeólogos franceses utilizan simplemente el cm^2/s (CGS) o el m^2/s (MKS).

Los hidrogeólogos americanos han definido el meizos. Es la permeabilidad de un terreno que deja filtrar un galón (3.785 l) por día, por pie cuadrado de sección (0.0929 m²) bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad, a la temperatura de 60°F (15.5°C).

Coeficiente de permeabilidad intrínseca.

Los geólogos de petróleo utilizan el darcy. Si partiendo de la fórmula (4.17), adoptamos las siguientes unidades (CGS): viscosidad μ en centipoises, caudal Q en cm³/s, sección S en cm², carga Δp en atmósferas, y longitud L en centímetros, a una temperatura de 20°C, obtenemos:

$$1darcy = \frac{\frac{1centipoise * 1cm^3 / s.}{1 / cm^2}}{1atm / 1cm}$$

El darcy es pues la permeabilidad de un material acuífero que suministra 1 cm³/s a través de una superficie de 1 cm², bajo un gradiente normal a esta superficie de 1 atmósfera por centímetro.

Podemos admitir que 1 darcy corresponde a 0.966*10⁻³ cm/s (a 20°C), o sea aproximadamente 1*10⁻³ cm/s.

Valores de permeabilidad de las rocas y de los terrenos.

El coeficiente de permeabilidad utilizado usualmente para caracterizar una roca o un terreno, es el coeficiente de permeabilidad Darcy. Se expresa en cm/s o m/s para un número afectado por una potencia de 10.

$$k = A.10^{-n} \text{ o } k = A.10^n$$

Los valores de permeabilidad de rocas varían entre 10^2 y 10^{-9} cm/s. La distinción entre rocas permeables e impermeables se ha fijado convencionalmente en 10^{-7} cm/s.

Según su permeabilidad podemos distinguir:

- Las rocas muy permeables $k > 10$ cm/s;
- Las rocas permeables $10 > k > 10^{-4}$ cm/s;
- Las rocas poco permeables $10^{-4} > k > 10^{-7}$ cm/s.;
- Las rocas impermeables $k < 10^{-7}$ cm/s.

4.1.4. Caudal

El caudal del flujo Q es la cantidad de agua que se filtra a través de una sección transversal S de la capa acuífera durante la unidad de tiempo (Castany 1975). Viene dado por la fórmula:

$$Q = kSi \quad (4.18)$$

El caudal unitario q es el caudal que circula por unidad de superficie o de anchura de sección en la unidad de tiempo:

$$q = kHi \quad (4.19)$$

siendo H la potencia del manto acuífero.

Reemplazando i por su valor según la fórmula (4.10), obtenemos:

$$q = -kH \frac{dH}{dx} \quad (4.20)$$

Velocidad aparente

La velocidad calculada según la ley de Darcy, $v=ki$, determinada en función del caudal, es igual a Q/S . Está por lo tanto referida a la sección total (sólido y espacios vacíos) del material acuífero. La denominamos velocidad aparente.

Velocidad real media y velocidad real efectiva.

En la realidad, las aguas subterráneas circulan únicamente a través de los poros de la roca. Por lo que la sección de flujo se halla limitada a los espacios vacíos, es decir, a la porosidad total m . Es igual a $S \cdot m$. En estas condiciones podemos determinar una velocidad real media v_m ligada al caudal mediante la fórmula:

$$v_m = \frac{Q}{Sm} = \frac{ki}{m} \quad (4.21)$$

Ya que solamente el agua gravífica puede circular por los terrenos acuíferos, cuyo espacio útil para la circulación de las aguas subterráneas se reduce, a la sección libre de los poros y está determinada, por consiguiente, por la porosidad eficaz m_e . Esto implica una velocidad real efectiva v_e :

$$v_e = \frac{Q}{Sm_e} = \frac{ki}{m_e} \quad (4.22)$$

Si en la fórmula (4.21) reemplazamos Q/S por la velocidad aparente v , obtenemos la relación entre v y la velocidad real media v_m :

$$v_m = \frac{v}{m} \quad (4.23)$$

La velocidad aparente está relacionada con la velocidad real efectiva y con la porosidad eficaz mediante la fórmula:

$$v_e = \frac{v}{m_e} \quad (4.24)$$

La relación entre la velocidad real efectiva v_e y la velocidad real media v_m se expresa, por lo tanto así:

$$\frac{v_e}{v_m} = \frac{m}{m_e} \quad (4.25)$$

La ley de Darcy en función de la velocidad real efectiva se convierte en:

$$v_e = \frac{ki}{m_e} \quad (4.26)$$

Caudal real medio y caudal real efectivo.

El caudal real medio Q_m puede expresarse mediante la fórmula:

$$Q_m = v_m S m t \quad (4.27)$$

donde t es el tiempo.

De la misma forma, el caudal real efectivo Q_e es igual a:

$$Q_e = v_e S m_e t \quad (4.28)$$

4.1.5. Transmisibilidad

En la ley de Darcy intervienen en el cálculo del caudal en movimiento, la permeabilidad y la superficie de flujo ($Q = kiS$).

Entonces si la sección de flujo S tiene una longitud L y una potencia H igual a la del horizonte acuífero:

$$S = HL \quad (4.29)$$

Si reemplazamos S por este valor en la fórmula (4.18) tenemos:

$$Q = kHLi \quad (4.30)$$

El producto kH o ke se ha designado, como la Transmisibilidad Theis (1938). La Transmisibilidad es por consiguiente, el producto de la permeabilidad por la potencia del horizonte acuífero en la sección transversal considerada. La ley de Darcy puede entonces expresarse:

$$Q = T Li \quad (4.31)$$

La transmisibilidad tiene las dimensiones del producto de una velocidad por una longitud ($L^2 T^{-1}$) y se expresa por lo tanto en m^2/s o cm^2/s .

4.2. Calidad Química del agua de los pozos

Se debe señalar que las aguas presentan sales disueltas disociadas, dada su débil concentración, en forma de iones (iones electronegativos o aniones e iones electropositivos o cationes).

Así entre los principales aniones por orden de importancia se tiene: Cl' , Br' , SO_4'' , CO_3H' , I' , y F' .

El anión Cl' es el más frecuente y proviene de la disociación de los cloruros $ClNa$ y ClK . El bromo, Br' se encuentra asociado frecuentemente con el potasio, el sodio y el magnesio. El SO_4'' es frecuente. El CO_3H' es el anión más extendido en las aguas subterráneas, en las que muy pocas veces está ausente. El yodo I'

esta también bastante extendido. El flúor F' es evidentemente de vital importancia en las aguas fluoradas.

Por otro lado entre los principales cationes tenemos: el catión sodio Na^+ que es el más extendido y casi nunca está ausente. Está combinado formando cloruros, bicarbonatos, y sulfuros. Los cloruros son los más abundantes. El potasio K^+ es también frecuente formando sulfatos, carbonatos o cloruros. Está subordinado al sodio, pero se halla en menor cantidad. El litio Li^+ siempre en pequeñas cantidades. El calcio Ca^{++} es el catión más frecuente por ser muy abundante en las rocas sedimentarias. El magnesio Mg^{++} acompaña a menudo al calcio formando carbonatos y cloruros. El hierro Fe^{++} es frecuente combinado en carbonatos, sulfatos o complejos orgánicos. El bario Ba^{++} , el estroncio St^{++} , y el aluminio Al^{+++} son más raros. La presencia de amonio NH_4^+ es bastante rara.

Los resultados de los análisis se expresan generalmente para los principales iones, en miligramos por litro. El residuo seco expresa el peso total de las sales disueltas.

Los resultados de los análisis pueden representarse de tres formas:

- Reconstitución de las sales disueltas;
- Forma iónica;
- Miliequivalentes.

La reconstitución de las sales disueltas a partir de los iones es hipotética. Consiste en reconstituir las sales más frecuentes: ClK, ClNa, SO_4Na_2 , SO_4Ca , SO_4Mg , $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$, $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Mg}$.

Se empieza por el cloro que se une en primer al potasio (ClK), después al sodio (ClNa) y eventualmente al magnesio y al calcio.

A continuación se asocia el SO_4 con el sodio que no ha sido utilizado por el cloro (SO_4Na_2), después con el calcio (SO_4Ca) y el magnesio (SO_4Mg). Los restos de Ca y de Mg se unen al CO_3 para dar los bicarbonatos $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$ y $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Mg}$. Estas reconstituciones de sales disueltas no permiten interpretaciones exactas.

La forma iónica presenta simplemente los iones agrupados en aniones y cationes y el residuo seco, expresados en mg/l; el pH y el grado hidrotimétrico °dH.

Miliequivalentes. Los estudios químicos han demostrado que la capacidad química de reacción de un elemento en disolución no depende de su contenido en peso de sales disueltas sino más bien del número de equivalentes que entran en reacción. Por este motivo se expresan los resultados de los análisis en *valencia miligramo* por litro. Esta cantidad se designa con el término de *miliequivalente* o de *milivalencia*. El miliequivalente se obtiene dividiendo el peso de los

elementos, expresado en miligramos por litro, por su equivalente químico, que es igual a :

$$\text{Equivalente} = \frac{\text{peso atómico o pesomolecular en mg}}{\text{valencia}}$$

Los números así obtenidos son las cantidades en reacción (reacting value) que, según Stabler, se designa con la letra r, y se expresa en mg/l.

Las sumas de las cantidades en reacción de los cationes y de los aniones deben ser sensiblemente iguales. La suma de todas las cantidades en reacción es la *concentración en equivalentes* que es designada por la letra C.

Para comparar las aguas, hay que calcular el porcentaje de cada elemento en relación a la concentración en equivalentes C. Se obtiene así la *cantidad en reacción por cien, r%*.

$$r\% = \frac{r \cdot 100}{C}$$

La diferencia entre las sumas de las cantidades en reacción por cien r% de los aniones y de los cationes no debe sobrepasar el 6% del total.

Los resultados de los análisis, expresados en la forma iónica, pueden colocarse en diagramas que permiten comparar las aguas y

clasificarlas en familias químicas. Las representaciones comúnmente utilizadas son:

- Los gráficos en columnas;
- Los diagramas triangulares;
- Los diagramas cuadrados;
- Los diagramas radiados;
- Los diagramas logarítmicos verticales.

En el presente estudio se han utilizado los diagramas triangulares que a continuación se explica. Estos se construyen partiendo de las cantidades en reacción por ciento. Se divide cada uno de los tres lados de un triángulo equilátero en 50 partes iguales, obtenemos un diagrama con tres ejes de coordenadas paralelas a las alturas. Las cantidades en reacción por ciento se colocan en cada eje. En un primer triángulo se colocan los tres principales aniones SO_4 , CO_3 y Cl , y en un segundo triángulo, los tres principales cationes Ca , Mg y $\text{Na}+\text{K}$. Se pueden delimitarse en cada triángulo tres sectores en los que predomina un ion, apareciendo en el centro composiciones mixtas. Pueden delimitarse así, en el triángulo de los aniones, los sectores sulfatados, clorurados, carbonatados y mixtos, y en el triángulo de los cationes, los sectores magnésicos, cálcicos, sódicos y mixtos.

Para poder comparar las aguas, se agrupan los seis iones principales en un solo triángulo. La posición de los puntos representativos de los aniones y de los cationes en el diagrama triangular permite determinar el tipo de composición química del agua representada. Por lo tanto, aguas del mismo origen aparecerán en el diagrama triangular formando agrupamientos de puntos.

El diagrama triangular permite, determinar en la mayoría de los casos, partiendo de los resultados iónicos del análisis químico, el tipo de agua, y comparar los diversos tipos entre sí. La ventaja de este diagrama es que atenúa las dispersiones debidas a las anomalías secundarias.

A continuación se presentan los datos de los análisis químicos realizados en 5 pozos de la zona, con los cuales se procede a realizar los diagramas triangulares (Figura 4.3), utilizando el programa Rockworks 99, el cual permite sistematizar la operación realizando automáticamente los cálculos para determinar el TSD Total de Sólidos Disueltos (partes por millón).

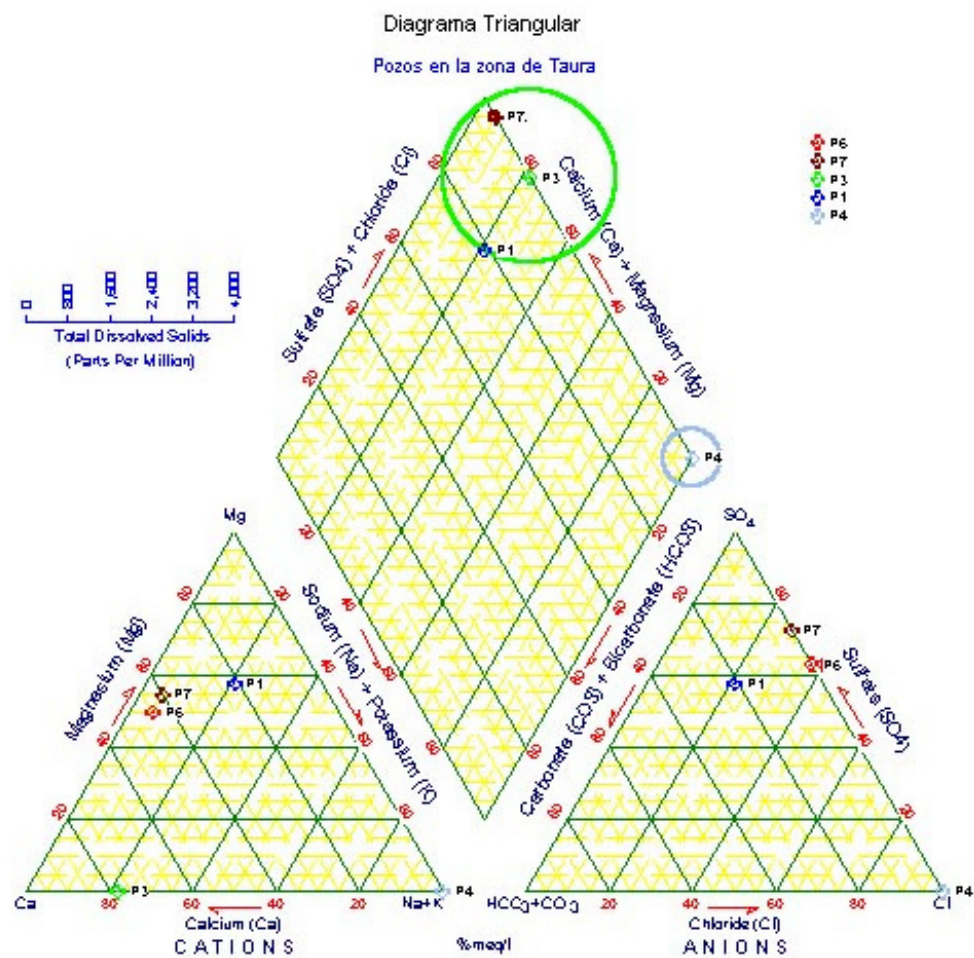


Figura 4.3. Diagrama Triangular

TABLA 3

Datos de los Análisis Químicos realizados en los Pozos

Pozo	P1	P3	P4	P6	P7
Na		350	325		
K				3.92	2.92
Ca		1082		16.53	11.20
Mg				11.20	9.28
Cl		250	255	16.43	14.56
SO4				38	52
Fe	5	1.2	1.32	0.13	0.07
Dureza(CaCO3)	380	2705	526	87.96	66.64
Alcalinidad		1500	890	247.85	563.08
SiO2				51.40	41.10
TSD		1682	580	86.1	90
Temperatura	24	24	24		
PH	6.5	7.5	7.5	7.66	7.65
O2 Disuelto		4.2			
Salinidad(ppt)	17	8	5.2	0.03	0.03
Sólidos Susp.				20	6
Comentario	Unidades (mg/l)	Unidades (mg/l)	Unidades (mg/l)	Unidades (mg/l)	Unidades (mg/l)

En el Diagrama Triangular (Figura 4.3) se aprecia que las mayores cantidades de Total de Sólidos Disueltos (TSD) se localizan en el agua de los pozos P3 y P4 con 1682 ppm y 580 ppm, respectivamente, mientras que bajas cantidades fueron obtenidas de los análisis del agua de los pozos P6 y P7 con 86.1 y 90 ppm en TSD, respectivamente. En base a la Figura 4.3 y a la Tabla 3, se deduce que las concentraciones salinas disminuyen en sentido W-E a medida que se alejan de el estuario del Río Guayas, siendo la concentración más alta la examinada en el pozo P1, con 17 ppt (partes por mil) de Salinidad, continúa el agua del pozo P3 con 8 ppt de Salinidad, luego la del pozo P4 con 5.2 ppt de salinidad, y la mínima concentración examinada es la de los pozos P6 y P7 con 0.03 ppt. Confirmándose así la presencia de la intrusión salina hasta la zona comprendida entre los pozos P3 y P6.

4.3. Relaciones Agua Dulce-Agua Salada

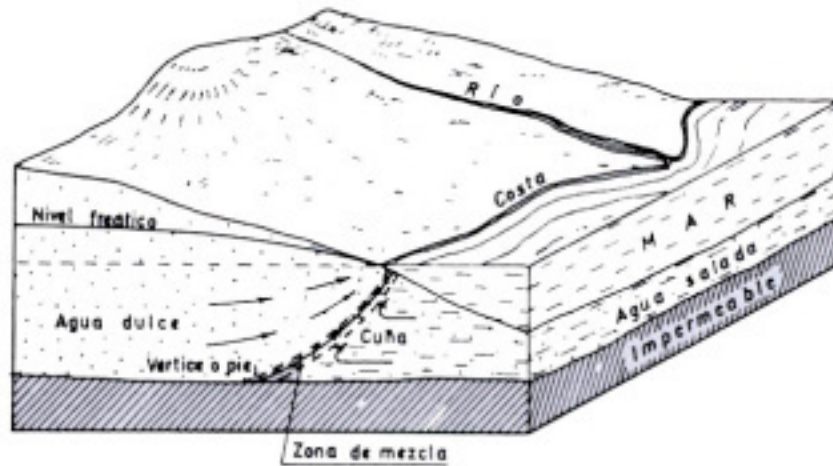


FIGURA 4.4 Cuña de agua salada en un acuífero costero

El estudio de las relaciones agua dulce-agua salada es bastante complejo, debido a que a más de las dificultades en el estudio del movimiento de las aguas subterráneas se debe agregarle la presencia de agua de densidad diferente, presentándose además pequeñas diferencias de viscosidad y a veces de temperatura.

Se denomina agua salada o masa de agua salada al agua con un contenido de cloruros igual o muy próximo al del mar (Custodio), en este caso próximo al agua presente en el estuario del Río Guayas. Cuña de agua salada o cuña salina es una masa de agua salada de gran longitud con sección en forma de cuña apoyada en la base del

acuífero y con el vértice o pie hacia adentro del continente (Figura 4.3), es la forma normal de las masas de agua salada. Se denomina cono de agua salada o domo de agua salada a toda protuberancia vertical de la masa de agua salada; se produce como consecuencia de bombeos o drenajes locales en una zona en la que hay agua dulce sobre agua salada (Fig. 4.4) (Custodio).

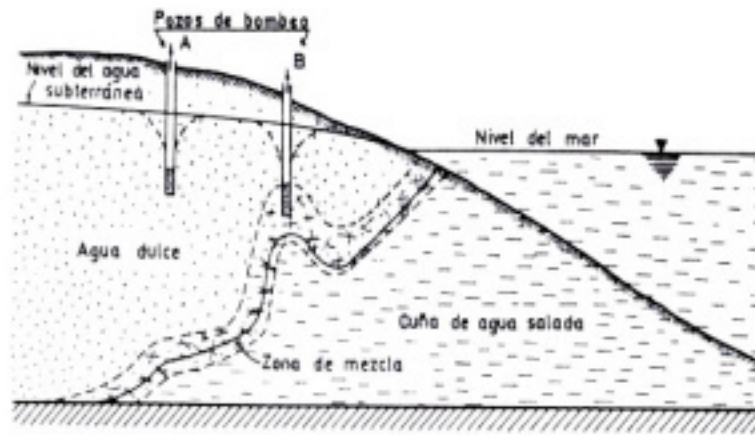


FIGURA 4.5 Formación de agua salada debajo de captaciones

4.3.1. Intrusión salina.

Se llama intrusión de agua salada o marina al movimiento permanente o temporal de agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce (Custodio). El agua captada en un acuífero costero se contamina (saliniza) cuando la captación se establece en una masa de agua subterránea dulce sobre agua salada; debido a la diferencia de densidad y al excesivo

bombeo puede producirse una ascensión de sal formando un cono (Figura 4.4). A veces ésta contaminación puede provenir de infiltración de agua de otros acuíferos salinizados, bien por goteo o por deficiencias en el pozo . Se debe considerar también la contaminación por inundaciones de agua salada durante tormentas, si el pozo está en una llanura costera de muy baja cota, como en el presente caso de estudio.

El límite entre dos fluidos inmiscibles, tales como agua y petróleo está claramente definido y es brusco, formando una interfase, pero si dos líquidos son miscibles, tales como agua dulce y agua salada, no existe una interfase brusca sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla, llamada también zona de difusión o de transición.

La zona de mezcla dentro de la que se sitúa la interfase teórica, es una zona dinámica en la cual el agua se mueve no sólo como consecuencia de las diferencias de densidad, sino también a consecuencia de cambios de nivel piezométrico en ambos líquidos.

El peso específico del agua dulce se puede tomar como $\gamma_d=1000 \text{ kg/m}^3$. El peso específico del agua marina es mayor, y puede tomarse entre 1020 y 1030 según la salinidad y

temperatura, siendo el valor más usual el de $\gamma_s = 1025$ (para 1900 ppm en Cl^- , equivalentes a 35 g/l de sales disueltas). La viscosidad del agua marina es del orden de un 30% mayor que la del agua dulce a igual temperatura.

4.3.2. Técnicas de estudio de la relación agua dulce-agua salada

Las técnicas utilizadas para el estudio práctico de las relaciones agua dulce-agua salada en las regiones costeras, no se diferencian en nada de las utilizadas en hidrología. Aunque se requiere una mayor precisión. Aunque puedan perforarse sondeos y piezómetros es una técnica muy costosa.

La forma más directa de determinar la situación de la zona de interfase o de la zona de mezcla del agua dulce y el agua salada en un determinado acuífero es mediante análisis químicos de muestras de agua tomadas a diferentes profundidades. Para ello se precisa tener una serie de piezómetros o pozos con zonas ranuradas cortas y situadas a diferentes profundidades. Si la zona ranurada es larga en comparación con el espesor del acuífero, es preciso comprobar que no existen corrientes verticales que alteren la estratificación de salinidad si el pozo está en reposo, y si la muestra se toma

por bombeo representa una mezcla de agua de diferentes niveles.

La toma de muestras se puede efectuar con un tomamuestras o bien por bombeo de corta duración en pozos de rejilla corta. Si el piezómetro está bien construido y el potencial del acuífero es inferior al de otros acuíferos superiores puede tenerse en los alrededores de la rejilla un agua infiltrada a lo largo de las paredes del tubo que no represente al punto muestreado.

Los pozos costeros que funcionan habitualmente pueden presentar salinidades elevadas, las cuales representan un fenómeno local de formación de un cono de agua salada, el cual sólo indica la existencia de agua salina en la base del acuífero, pero a profundidad desconocida.

Existen tomamuestras que descienden cerrados y se abren a la profundidad deseada, pero son más comunes los que se bajan abiertos y se cierran a la profundidad deseada mediante un mensajero. En ambos casos las muestras deben tomarse a profundidades crecientes ya que el tomamuestras altera la estratificación de la zona por la que ha circulado. Los tomamuestras que descienden abiertos deben bajarse lentamente para no arrastrar aguas de tramos superiores y no

deben reposicionarse elevándolos ya que si se arrastran pequeñas fracciones de un agua más salina de mayor profundidad, alteran totalmente la muestra; para evitar en lo posible los arrastres, conviene que la resistencia a la circulación por el interior sea pequeña y que su diámetro sea sólo algo menor que la del tubo del sondeo o pozo.

Se puede evitar la toma de muestras efectuando un registro vertical de salinidad con una célula conductivimétrica sumergible calibrada. Sólo se tomarán en consideración los valores medidos en la zona filtrante ya que el resto del pozo o sondeo puede contener un agua de otras características procedente de bombeos anteriores, agua inyectada en ensayos, etc., la cual puede permanecer allí sin casi alteración alguna durante mucho tiempo. Hay que tener cuidado con los datos del tramo final del piezómetro ya que están a veces falseados por la existencia de lodos o sedimentarse allí las aguas más salinas.

Si en la construcción del pozo se efectúa una testificación eléctrica, como en los casos presentados anteriormente, pueden determinarse aproximadamente los límites de las zonas de agua salada si se conoce la litología. Así, por ejemplo cuando la resistividad decrece gradualmente sin un cambio

litológico que lo justifique, es posible que el agua en el acuífero sea cada vez más salina. El límite de la zona de mezcla en el lado del agua salada es mucho más difícil de determinar puesto que la resistividad se acerca a cero cuando la concentración de cloruros en el agua excede unos pocos g/l. En general es útil la testificación de resistividad y potencial espontáneo. Si el piezómetro es de plástico y está ranurado en toda su longitud, puede efectuarse periódicamente una testificación de resistividad eléctrica aparente del terreno.

Los métodos geofísicos eléctrico-resistivos de determinación desde la superficie de las posibles zonas de intrusión salina deben realizarse con precaución aunque los resultados pueden resultar bastante útiles e interesantes, como en el presente estudio que sirvieron para la determinación de la intrusión, varios kilómetros hacia el continente.

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones:

Una vez finalizado este estudio, las conclusiones a las que se ha logrado llegar son las siguientes:

- a) De la geología regional y local, se concluye que el área de estudio se encuentra sobre depósitos recientes no consolidados de origen aluvial. Superficialmente se encuentra una cobertura de arcilla gris o café, aunque en ciertos sitios se observan acumulaciones de arena, pero se trata de depósitos puntuales. Los sedimentos que se encuentran en la zona provienen de la Cordillera Occidental, los que han sido transportados por los ríos de la zona, y posteriormente acumulados en las márgenes de éstos.
- b) En base a las interpretaciones geofísicas, se obtiene:

De manera general un esquema de resistividades señalado en el Anexo A, que sirvió para realizar el diagrama esquemático del corte geoelectrico de la zona (Figura 3.12).

Como se observa los sondeos a, b y c, presentan curvas ascendentes que indican la presencia de depósitos cuaternarios: lodos, limos, arcillas y arenas de ρ entre 2.5 y 3.4 Ω -m. Debido a que en este tramo existe una tendencia conductiva, se concluye que el valor de resistividad calculado, está afectado por una mayor concentración de sales en los estratos acuíferos, debido a los efectos ocasionados por la intrusión salina, de las aguas del estuario del Río Guayas.

Por otro lado los sondeos d, e y f presentan curvas que indican la presencia de depósitos aluviales: lodos, limos, arcillas y arenas, con valores de resistividad entre 4 y 14.2 Ω -m. lo que indica la presencia de agua con bajas concentraciones de sales. Lo que indica que la intrusión salina no ha avanzado hasta esta zona.

- c) De los registros litológicos y testificación eléctrica se concluye que a la altura del pozo P3 se comprueba lo expuesto en los sondeos a, b y c, respecto a que una intrusión salina se encuentra afectando a los acuíferos de la zona, debido a que se observan valores bajos de resistividad entre 10 y 40 ohm-m. mientras que

con los registros del pozo P6, se concluye que la intrusión salina no ha avanzado hasta esta zona, porque los valores de resistividad son altos entre 23 y 128 ohm-m. lo que indica que el agua es dulce y se puede utilizar para uso agrícola o doméstico. De lo antes expuesto se deduce que la interfaz entre el agua dulce y la cuña salina se encuentra entre los pozos P3 y P6.

- d) De los análisis químicos del agua de los pozos se obtuvo que las concentraciones salinas disminuyen en sentido W-E a medida que se alejan de el estuario del Río Guayas, siendo la concentración más alta la examinada en el pozo P1, con 17 ppt (partes por mil) de Salinidad, continúa el agua del pozo P3 con 8 ppt de Salinidad, luego la del pozo P4 con 5.2 ppt de salinidad, y la mínima concentración examinada es la de los pozos P6 y P7 con 0.03 ppt. Confirmándose así la presencia de la intrusión salina hasta la zona comprendida entre los pozos P3 y P6. Esto es corroborado por la (Figura 4.3) en la que se representa el Total de Sólidos Disueltos en ppm (partes por millón).
- e) Desde el punto de vista hidrológico, la zona de estudio se encuentra en la cuenca baja del río Guayas, la subcuenca del Taura se origina en la Cordillera Occidental con el nacimiento del Río Bulu-Bulu, que al unirse con el Barranco Alto, toma el nombre

de Boliche, el cual en su curso inferior recibe las aguas del Río Culebra, y forman el Río Taura que aporta su descarga hacia el Río Guayas.

5.2. Recomendaciones

- a) Realizar perforaciones en la zona comprendida entre los pozos P3 y P6 para delimitar la interfase entre el agua dulce y la intrusión salina, o en su defecto una campaña geofísica de Sondeos Eléctricos Verticales, con el mismo objetivo.
- b) Realizar en los pozos que se construyan en el futuro por parte de los propietarios de las haciendas o por parte del Estado, registros litológicos, pruebas de bombeo y de calidad de agua, análisis químicos completos de las aguas de los pozos, incluyendo los principales aniones y cationes, para así obtener información completa y valedera de estos puntos acuíferos.
- c) El Estado debería regular la futura construcción de los pozos y extracción de agua desde éstos en el área cercana al estuario, ya que una sobreexplotación de los recursos acuíferos en la zona, agravaría el problema de la intrusión salina, ocasionando daños irreversibles a la naturaleza.

ANEXOS

ANEXO A

DATOS DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

TABLA 1
SONDEO a

AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	Resistencia (ohm)	Resistividad (ohm-m)
3	2	12.6	0.0571	0.72
5	2	37.7	0.0191	0.72
7	2	75.4	0.0101	0.76
10	2	115.5	0.0074	0.86
10	5	58.9	0.0148	0.87
15	5	137.5	0.0079	1.09
20	5	247.5	0.0055	1.36
30	5	562	0.0027	1.52
40	5	1001	0.0019	1.91
50	5	1567	0.0013	2.07
50	20	377	0.0064	2.41
70	5	3075	0.0007	2.19
70	20	754	0.0032	2.41
100	30	1555	0.0016	2.55

TABLA 2
SONDEO b

AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	Resistencia (ohm)	Resistividad (ohm-m)
3	2	12.6	0.0579	0.73
5	2	37.7	0.0196	0.74
7	2	75.4	0.0095	0.72
10	2	115.5	0.0076	0.88
10	5	58.9	0.0151	0.89
15	5	137.5	0.0075	1.03
20	5	247.5	0.0046	1.15
30	5	562	0.0025	1.41
40	5	1001	0.0015	1.51
50	5	1567	0.0010	1.59
50	20	377	0.0044	1.66
70	5	3075	0.0004	1.32
70	20	754	0.0027	2.01
100	30	1555	0.0019	2.95

TABLA 3
SONDEO c

AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	Resistencia (ohm)	Resistividad (ohm-m)
3	2	12.6	0.0571	0.72
5	2	37.7	0.0191	0.72
7	2	75.4	0.0099	0.75
10	2	115.5	0.0070	0.81
10	5	58.9	0.0139	0.82
15	5	137.5	0.0063	0.87
20	5	247.5	0.0041	1.01
30	5	562	0.0022	1.24
40	5	1001	0.0014	1.40
50	5	1567	0.0012	1.87
50	20	377	0.0042	1.59
70	5	3075	0.0006	1.81
70	20	754	0.0025	1.86
100	30	1555	0.0014	2.18
150	20	3520	0.0008	2.82
200	20	6270	0.0004	2.5

TABLA 4
SONDEO d

AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	Resistencia (ohm)	Resistividad (ohm-m)
3	2	12.6	0.4206	5.3
5	2	37.7	0.1565	5.9
7	2	75.4	0.0862	6.5
10	2	115.5	0.0554	6.4
10	5	58.9	0.1171	6.9
15	5	137.5	0.0509	7.0
20	5	247.5	0.0271	6.7
30	5	562	0.0141	7.9
40	5	1001	0.0089	8.9
50	5	1567	0.0052	8.1
50	20	377	0.0241	9.1
70	5	3075	0.0026	8.1
70	20	754	0.0130	9.8
100	30	1555	0.0050	7.7
150	20	3520	0.0028	9.8

TABLA 5
SONDEO e

AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	Resistencia (ohm)	Resistividad (ohm-m)
3	2	12.6	0.8889	11.2
5	2	37.7	0.1698	6.4
7	2	75.4	0.0716	5.4
10	2	115.5	0.0424	4.9
10	5	58.9	0.0883	5.2
15	5	137.5	0.0407	5.6
20	5	247.5	0.0238	5.9
30	5	562	0.0119	6.7
40	5	1001	0.0073	7.3
50	5	1567	0.0052	8.1
50	20	377	0.0220	8.3
70	5	3075	0.0025	7.6
70	20	754	0.0103	7.8
100	30	1555	0.0057	8.8
150	20	3520	0.0030	10.5

TABLA 6
SONDEO f

AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	Resistencia (ohm)	Resistividad (ohm-m)
3	2	12.6	1.7540	22.1
5	2	37.7	0.4589	17.3
7	2	75.4	0.2056	15.5
10	2	115.5	0.1022	11.8
10	5	58.9	0.2003	11.8
15	5	137.5	0.0662	9.1
20	5	247.5	0.0295	7.3
30	5	562	0.0112	6.3
40	5	1001	0.0066	6.6
50	5	1567	0.0043	6.7
50	20	377	0.0178	6.7
70	5	3075	0.0022	6.8
70	20	754	0.0105	7.9
100	30	1555	0.0059	9.1
150	20	3520	0.0026	9.2
200	20	6270	0.0015	9.4
200	80	1508	0.0066	9.9

ANEXO B
DATOS DE POZOS

TABLA 1

POZO	EASTING	NORTHING	COTA	PROF.	DIAMETRO	CRIBAS	CAUDAL	ABATIM.	CAP. ESP.	TRANSMIS.	PERMEAB.
	metros	metros	m.s.n.m	metros	pulgadas	m bajo supf.	m3/día	m	m2/día	m2/día	m/día
P1	631652	9752348									
P2	637719	9747895									
P3	638251	9747495									
P4	642452	9749353					3997				
P5	642753	9757561		108	3	12.0-42.0					
P6	646006	9746397					5900	13	372	620	
P7	646920	9745962									
P8	649971	9753042	12.6	205	10	9.5-65.3	2823	5.46	517	466	
P9	650775	9751321		107							
P10	652351	9755495	11.5	90	8	5.5-11.7	3073	6.7	310	400	16.1
P11	655291	9750915		208						959.04	
P12	655489	9753121		55.57	12	2.57-55.57	1296	8.59	160		
P13	656281	9750885		204	10	4.4-34.9	1987	10.68	156	219	
P14	657508	9750851		130						933.12	
P15	658789	9754610		104	8	8-36.2	1211	2.18	555	730	21.2
P15						47.2-53.4	794	1.41	563	732	
P16	661858	9757218	13.5	104	8	5.5-22	1080	2.45	441	573	
P16						27.5-44	1313	2.19	600	780	23.6

ANEXO C
FOTOGRAFIAS



Fotografía 1. Camaronera Churute



Fotografía 2. Sondeos Cerro Taura



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

MAPA GEOLÓGICO CUENCA DEL GUAYAS



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

LEYENDA ESTRATIGRAFICA

SUR - CENTRAL

Qe	Arcillas marinas de estuario
Qs	Abanico aluvial mayor
Qt	Fm. Tablazo (50 - 100 m)
PIQs	Terrazas marinas bioclásticas
PIp	Fm. Balzar (300 m)
PIp	Arenas, conglomerados, arcillas
MPi	Fm. Puná (1300 m)
MPi	Lutitas, arcillas, arenas
MPi	Gpo. Zarumilla
MPi	Areniscas, conglomerados
MPi	Fm. Progreso (500 - 2700 m)
MPi	Areniscas, limolitas, lutitas
MPi	Fm. Subibaja (1000 m)
MPi	Limolitas calcáreas
MPi	Mbros. Dos Bocas → Villingota (0 - 2000 m)
MPi	Lutitas blancas → chocolates
MPi	Mbro. Zapotal (0 - 1100 m)
MPi	Congloms, areniscas tobáceas, lutitas
MPi	Gpo. Ancón (1200 m)
MPi	Turbiditas, lutitas
MPi	Fm. San Eduardo (30 - 100 m)
MPi	Calizas, lutitas
MPi	Gpo. Azúcar (3000 m)
MPi	Lutitas, areniscas, conglomerados
MPi	Fm. Guayaquil (400 m)
MPi	Lutitas silíceas
MPi	Fm. Cayo (2400 m)
MPi	Grawavas, lutitas, mantos basálticos (K x1)
MPi	Fm. Piñon
MPi	Lavas basálticas, tobas, brechas;
MPi	rocas ultrabásicas (K x1)

COSTA

Qe	Arcillas marinas de estuario
Qs	Fm. San Tadeo (100 - 1000m)
Qs	Abanico volcánico, láhars
Qp	Fm. Pichilingue (100 - 1200 m)
Qp	Terrazas, sedimentos fluviales
PIp	Fm. Borbón (200 m)
PIp	Areniscas tobáceas
MPi	Fm. Onzole (550m)
MPi	Lutitas, limolitas
MDa	Fm. Angostura (600 m)
MDa	Coquinas, areniscas, limolitas
Ez	Fms. Zapallo → San Mateo (700 m)
Ez	Turbiditas finas → gruesas
Kk	Fm. Cayo (2400 m)
Kk	Grawavas, lutitas, mantos basálticos (K x1)
Kp	Fm. Piñon
Kp	Lavas basálticas, tobas, brechas;
Kp	rocas ultrabásicas (K x1)

CENTRAL - NORTE

VALLE INTERANDINO

JG	Unidad Guamote, pizarras y cuarcitas
JKp	Unidad Peltetec, Melange ofiolítico
JZ	Unidad Alao-Paute, metalavas basálticas y andesíticas, esquistos

CORDILLERA REAL OESTE

ROCAS INTRUSIVAS

CZA	Granodiorita, diorita pórfido de edad cenozoica
-----	---

SIMBOLOGIA

---	RIOS
---	LIMITE DE CUENCA
---	FALLA
---	CONTACTO GEOLOGICO
---	ZONA DE ESTUDIO



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS
ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA SALINIDAD
EN LA ZONA DE TAURA

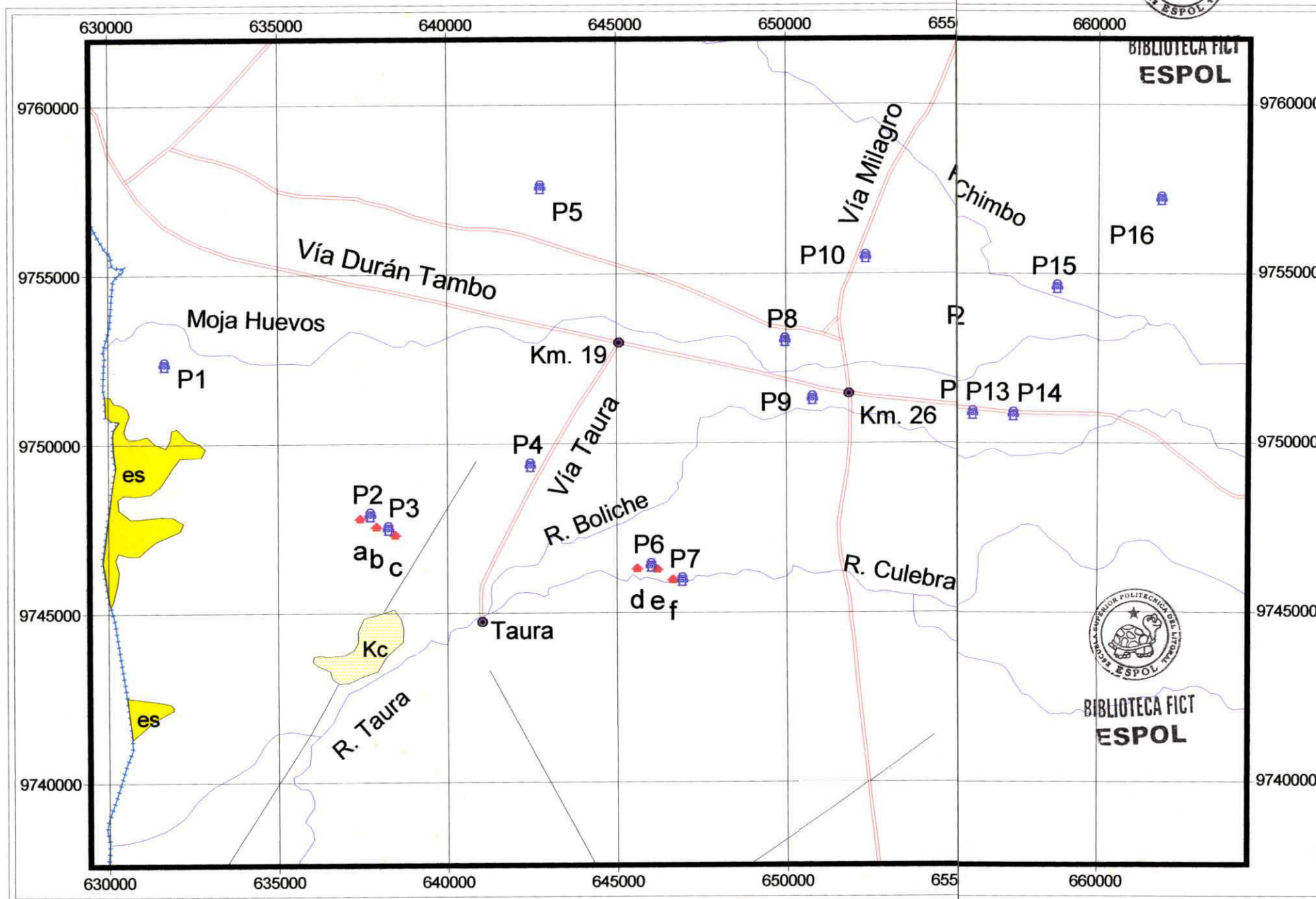
MAPA DE UBICACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

Dibujó: JORGE BARRAGAN CH. DIRECTOR DE TOPOG.: ING. JORGE CALLE Fecha: JUNIO / 2002 Mapa: 1 Escala: 1:1500000



BIBLIOTECA FICT
ESPOL

Ubicación de Pozos y Sondeos



SIMBOLOGIA

- Pueblos
- Pozos
- Sondeos Eléctricos Verticales

- Arenas, limos, lodos y fangos
- Formación Cayo
- Depósito aluvial

- Vías
- Ríos
- Perfil
- Fallas



ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS:
ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA SALINIDAD
EN LA ZONA DE TAURA

CONTENIDO:
UBICACION DE POZOS Y SONDEOS

DIBUJO:
ERNESTO BARRAGAN CHANG

DIRECTOR DE TOPICO:
ING. JORGE CALLE

FECHA:
JUNIO/2002

ESCALA:
1:150000

MAPA:
2

5 0 5 10 15 20 Kilometers

BIBLIOGRAFÍA

BRISTOW C. R., HOFFSTETTER R., Léxico Estratigráfico de América Latina, Fascículo 5 a2, Ecuador, Segunda Edición. 1977

CUSTODIO E., LLAMAS M. R., Hidrología Subterránea. Ed. Omega, 1976.

CASTANY G., Prospección y Explotación de las Aguas Subterráneas, Ediciones Omega, 1975.

CHAS T. MAIN INT. INC. El estudio de pre-factibilidad y factibilidad de los proyectos Milagro y Manuel J. Calle en la cuenca del Río Guayas, 1968.

DAVIS STANLEY N., DE WUEST ROGER J. M., Hidrogeología, Ediciones Ariel, 1971

DUGAS FRANCOIS, NUÑEZ DEL ARCO, Guía Geológica del Suroeste de la Costa Ecuatoriana, 1987.

GUAYASCONSULT, T. INGLEDOW ASSOCIATES LTD. CEDEGE. Investigación de las oportunidades de desarrollo económico de la Cuenca del

Río Guayas. Reconocimiento hidrogeológico de la Baja cuenca del Guayas.1970.

KALENOV E. N., Interpretación de Curvas de Sondeos Eléctricos Verticales, 1987.

MIFLIN MARTÍN, Disponibilidad del agua subterránea y desarrollo de la Cuenca Baja del Río Guayas.

SCHLUMBERGER, Interpretación de Registros, Principios y Aplicaciones, 1987.

Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos. (INERHI). Proyecto Naranjal-Río Siete. Estudio hidrogeológico. 1975.

Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos. (INERHI). Proyecto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de Yaguachi, Banco de Arena, Milagro. Estudio de factibilidad. Anexo E: Hidrogeología. 1977

Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos. (INERHI)-Consultora Real Holandesa de Ingenieros y Arquitectos (HASKONING). Estudio de factibilidad y diseño del control de inundaciones de la cuenca baja del Guayas. 1988.