



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN  
CON LA COLECTIVIDAD**

**MAESTRÍA EN SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL  
IV PROMOCIÓN 2004 -2005**

**TESIS DE GRADO MAESTRÍA EN SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL**

**TEMA: “MODELAMIENTO DE FLUJO Y TRANSPORTE DE METALES  
PESADOS EN ACUIFERO SUPERIOR DE LA ZONA URBANA DE LA  
PARROQUIA SAN CARLOS PROVINCIA DE ORELLANA A TRAVÉS DE  
LA CARACTERIZACIÓN IN SITU DEL SUBSUELO Y DE LAS AGUAS  
SUBTERRÁNEAS SOMERAS”**

**AUTOR: ING. HUGO FABIÁN BONIFAZ GARCÍA**

**DIRECTOR: Dr. LUIS CUMBAL Ph.D**

**SANGOLQUÍ, FEBRERO 2015**

**UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS ESPE**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN**  
**CON LA COLECTIVIDAD**

DR. LUIS CUMBAL Ph.D.  
DIRECTOR

DR. DAVID CARRERA PhD  
OPONENTE

**CERTIFICACIÓN**


Que el trabajo titulado "**MODELAMIENTO DE FLUJO Y TRANSPORTE DE METALES PESADOS EN ACUIFERO SUPERIOR DE LA ZONA URBANA DE LA PARROQUIA SAN CARLOS PROVINCIA DE ORELLANA A TRAVÉS DE LA CARACTERIZACIÓN IN SITU DEL SUBSUELO Y DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS SOMERAS**", realizado por el Ing. Hugo Bonifaz García ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el reglamento Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Debido a que el presente trabajo contribuye al conocimiento de los efectos de la contaminación de metales pesados por efectos de explotación petrolera se recomienda su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (PDF).

Autorizan a Bonifaz García Hugo Fabián, entregar el mismo a la Unidad de Gestión de Postgrados

Sangoquí, Febrero del 2015

  
DR. LUIS CUMBAL Ph.D.  
DIRECTOR

  
DR. DAVID CARRERA PhD  
OPONENTE

**UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS ESPE**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN  
CON LA COLECTIVIDAD**

**MAESTRÍA EN SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL IV  
PROMOCIÓN 2004-2005**

**DECLARACIÓN DE REPOSABILIDAD**

**Bonifaz García Hugo Fabián**

**DECLARO QUE**

El proyecto de grado denominado "MODELAMIENTO DE FLUJO Y TRANSPORTE DE METALES PESADOS EN ACUIFERO SUPERIOR DE LA ZONA URBANA DE LA PARROQUIA SAN CARLOS PROVINCIA DE ORELLANA A TRAVÉS DE LA CARACTERIZACIÓN IN SITU DEL SUB SUELO Y DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS SOMERAS", ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las referencias que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Febrero del 2015

  
Ing. Hugo Bonifaz García

## AUTORIZACIÓN

**Yo, HUGO FABIÁN BONIFAZ GARCÍA**

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución, del trabajo "MODELAMIENTO DE FLUJO Y TRANSPORTE DE METALES PESADOS EN ACUIFERO SUPERIOR DE LA ZONA URBANA DE LA PARROQUIA SAN CARLOS PROVINCIA DE ORELLANA A TRAVÉS DE LA CARACTERIZACIÓN IN SITU DEL SUB SUELO Y DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS SOMERAS", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Šangolquí, Enero del 2015



**HUGO FABIAN BONIFAZ GARCÍA**

## DEDICATORIA

A mi esposa Ruth Portilla (+), a mi hijo Alejandro Bonifaz P.

***Hugo Fabián Bonifaz García***

## **AGRADECIMIENTO**

A mi tutor Dr. Luis Cumbal PhD, por su sacrificada labor y paciencia al responder a todos mis requerimientos de aprendizaje durante todo el tiempo que tuve el honor de ser su discípulo.

A todos mis amigos y compañeros que de una u otro forma colaboraron en la logística, aprovisionamiento de equipos, recolección de datos de campo y al proveerme de conocimientos mediante comunicación personal de forma muy desinteresada.

A la Universidad de la Fuerzas Armadas - ESPE por darme la opción de estudiar un postgrado mediante una beca.

***Hugo Fabián Bonifaz García***

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN .....	1
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	2
AUTORIZACIÓN.....	3
DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
RESUMEN.....	18
ABSTRACT.....	19
CAPITULO I.....	20
FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.....	20
1.1    Flujo de Agua Subterránea .....	20
1.1.1    Las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico.....	20
1.1.2    Acuíferos .....	22
1.1.3    Parámetros hidrogeológicos fundamentales .....	24
1.1.4    Ecuaciones fundamentales del flujo de aguas subterráneas ...	26
1.2    Mecanismos de Transporte de Contaminantes .....	33
1.2.1    Advección.....	33
1.2.2    Dispersión .....	33
1.2.3    Difusión .....	34
1.2.4    Sorción .....	34
1.2.5    Adsorción .....	35
1.2.6    Desorción .....	35
1.2.7    Intercambio iónico .....	36
1.2.8    Precipitación.....	36
1.2.9    Modelos de sorción .....	36
1.3    Coeficientes de Distribución en los Metales Cd, Ni, Pb, V.....	38
1.3.1    Valores de Kd en función del pH.....	39
1.3.2    Valores considerando un coeficiente de distribución Kd constante.....	39
1.4    Caracterización de los suelos y aguas subterráneas.....	41
CAPITULO II.....	45

METODOLOGÍA, ENSAYOS DE CAMPO, LABORATORIO .....	45
2.1 Trabajo de Campo .....	46
2.1.1 Sísmica de refracción.....	46
2.1.2 Perforaciones realizadas en el subsuelo del área urbana de la Parroquia San Carlos.....	52
2.1.3 Colección de muestras para ensayos ambientales .....	57
2.1.4 Pruebas de bombeo.....	58
2.1.5 Medida de caudales (aforos) con molinete en río Huamayacu y estero Sapito .....	60
2.2 TRABAJOS DE LABORATORIO DE SUELOS.....	61
2.2.1 Ensayos de clasificación .....	61
2.2.2 Relaciones volumétricas .....	62
2.2.3 Ensayos Gravedad Específica, porosidad total.....	62
2.3 ENSAYOS QUÍMICOS .....	63
2.3.1 Preparación de muestras .....	63
2.3.2 Digestión de muestras.....	63
2.3.3 Medición de metales por Absorción Atómica .....	64
2.3.4 Medición de óxidos por difracción de rayos X.....	65
CAPITULO III.....	67
RESULTADOS.....	67
3.1 RESULTADOS ENSAYOS DE CAMPO.....	67
3.1.1 Resultados sondeos geofísica .....	67
3.1.2 Resultados de las perforaciones.....	75
3.1.3 Resultados generales de los sondeos.....	79
3.1.4 Resultados geohidráulicos .....	85
3.2 RESULTADOS DE MINERALOGÍA, ÓXIDOS, METALES PESADOS.....	94
3.2.1 Facciones mineralógicas.....	94
3.2.2 Concentración de óxidos metálicos.....	96
3.2.3 Concentración de metales pesados Níquel Ni, Cadmio Cd, Plomo Pb y Vanadio V. en agua y suelo .....	97
CAPITULO IV.....	85
MODELAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES .....	85
4.1 Introducción .....	85



4.1.1	Definición de los objetivos.....	86
4.1.2	Recopilación y obtención de datos.....	87
4.2	Desarrollo del Modelo conceptual.....	87
4.2.1	Geografía .....	89
4.2.2	Topografía.....	90
4.2.3	Hidrología del área de estudio .....	91
4.2.4	Precipitaciones.....	91
4.2.5	Evaporación .....	92
4.2.6	Recarga.....	93
4.2.7	Caudales de Río Huamayacu y Estero Sapito .....	94
4.2.8	Estratigrafía del subsuelo.....	94
4.2.9	Pozo de junta de agua .....	96
4.2.10	Cotas del nivel de agua.....	96
4.2.11	Propiedades hidráulicas de las capas.....	97
4.3	Primera parte. Construcción de modelo de flujo de agua subterránea	97
4.3.1	Sección 1: Creación del modelo.....	97
4.3.2	Sección 2. Ajuste del modelo y de la malla .....	101
4.3.3	Sección 3. Adición de las coordenadas de los pozos de observación y cotas de ubicación de los estratos en cada pozo.....	103
4.3.4	Sección 4. Asignación de las propiedades hidráulicas del acuífero	105
4.3.5	Conductividad .....	105
4.3.6	Almacenamiento.....	105
4.3.7	Objetivos de calibración para flujo de agua subterránea.....	106
4.3.8	Datos pozo de bombeo de la junta parroquial.....	107
4.3.9	Sección 5. Asignación de las condiciones de borde.....	107
4.3.10	Sección 6. Calibración del modelo .....	110
4.4	Segunda parte.- Modelo de transporte de contaminantes .....	117
4.4.1	Parámetros de los contaminantes transportados.....	117
4.4.2	Propiedades de las especies contaminantes .....	118
4.4.3	Coeficientes distribución .....	119
4.4.4	Condiciones de borde. Concentración constante.....	119
4.4.5	Plumas de contaminación .....	119
4.5	Tercera parte: Visualización de resultados, Plumas de contaminación.....	120
4.5.1	Pluma Contaminación del Cadmio en 3D, tridimensional.....	120

4.5.2	Cadmio: Cadmio Mapas escala 1:2000. 2D, bidimensional. ...	122
4.5.3	Pluma contaminación de Níquel en 3D, tridimensional. ....	124
4.5.4	Níquel; Mapas escala 1:2000 en 2D, bidimensional.....	126
4.5.5	Pluma Contaminación de Plomo en 3 D, tridimensional.....	129
4.5.6	Plomo: Mapas escala 1:2000 en 2D, bidimensional.....	131
4.5.7	Pluma de contaminación Vanadio en 3D, tridimensional .....	132
4.5.8	Vanadio: Mapas escala 1:2000 en 2D, bidimensional.....	134
CAPITULO V.....		138
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....		138
5.1	DE LA GEOFÍSICA.....	138
5.2	DE LOS SONDEOS.....	140
5.2.1	Sondeos de exploración.....	140
5.2.2	Respecto al tipo de suelo.....	141
5.2.3	Respecto a la estratigrafía. ....	142
5.3	De la hidrología.....	143
5.3.1	Precipitación.....	144
5.3.2	Evaporación .....	146
5.3.3	Recarga.....	147
5.3.4	Análisis de las permeabilidades .....	149
5.4	DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA .....	149
5.4.1	Metales Cd, Ni, Pb, V .....	150
5.5	Comportamiento de plumas de metales pesados Níquel, Cadmio, Plomo, Vanadio .....	150
5.5.1	Características químicas del suelo.....	151
5.5.2	Adsorción en las arcillas.....	152
5.5.3	Adsorción en los minerales de hierro .....	154
5.5.4	Efectos de la electronegatividad.....	157
5.5.5	Constantes de solubilidad .....	158
5.6	Resultados de las plumas de contaminación.....	161
5.6.1	Pluma del Cadmio .....	162
5.6.2	Pluma del Níquel.....	163
5.6.3	Pluma de Plomo.....	163
5.6.4	Pluma del Vanadio .....	164
CAPÍTULO VI.....		166
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		166

	10
6.1 CONCLUSIONES .....	166
6.2 RECOMENDACIONES.....	168
CAPÍTULO VII.....	169
LITERATURA CITADA .....	169

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1: Ciclo del agua. Fuente: Sánchez San Román. Hidrología .....	22
Figura 1.2: Tipos de acuíferos. Fuente: Sánchez San Román. Hidrología ..	23
Figura 1.3: Ley de Darcy.....	27
Figura 1.4: Sección de un acuífero .....	28
Figura 1.5: Esquema de la dispersión mecánica .....	30
Figura 1.6: Volumen de control bidimensional .....	31
Figura 2.1: Ensayo sísmica de refracción .....	46
Figura 2.2: Ubicación de líneas de perfiles sísmicos .....	51
Figura 2.3: Ubicación de sondeos.....	54
Figura 2.4: Esquema de acuífero no confinado. Fuente Bedient, 1999 .....	60
Figura 3.1: Croquis ubicación de los perfiles sísmicos. ....	67
Figura 3.2: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-1 .....	68
Figura 3.3: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-2 .....	68
Figura 3.4: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-3 .....	69
Figura 3.5: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-4 .....	69
Figura 3.6: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-5 .....	70
Figura 3.7: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-6 .....	70
Figura 3.8: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-7 .....	71
Figura 3.9: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-8 .....	71
Figura 3.10: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-9 .....	72
Figura 3.11: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-10 .....	72
Figura 3.12: Perfil estratigráfico solapado según líneas sísmicas LS-3 y LS-9. Esc. H: 1:1000, V: 1:100. Simbologías: A) Limos y arcillas superficiales con lentes esporádicos de arena fina B) Arenas finas C) Arenisca meteorizada.....	73
Figura 3.13: Perfil estratigráfico solapado según líneas sísmicas LS-2 y LS-6. Esc. H: 1:1000, V: 1:100. Simbología: A) Limos y arcillas superficiales con lentes esporádicos de arena fina B) Arenas finas C) Arenisca meteorizada .....	74
Figura 3.14: Perfil estratigráfico solapado según líneas sísmicas LS-1 y LS-8. Esc. H: 1:1000, V: 1:100. Simbología: A) Limos y	

arcillas superficiales con lentes esporádicos de arena fina B)	
Arenas finas C) Arenisca meteorizada.....	74
Figura 3.15: Ubicación de sondeos de exploración .....	77
Figura 3.16: Perfil estratigráfico pozos someros .....	82
Figura 3.17: Perfil estratigráfico pozos profundos.....	83
Figura 3.18: Porosidad total vs porosidad efectiva. Fuente modificada de Sanders (1998).....	84
Figura 3.19: Ubicación ensayos de bombeo.....	86
Figura 3.20: Ensayo bombeo pozo PA02 .....	88
Figura 3.21: Variación de profundidad nivel freático con el tiempo en los sondeos del área urbana. ....	93
Figura 3.22: Ensayo mineralógico total. Fuente autor.....	95
Figura 3.23: Concentración de Ni en suelo vs Ni en agua .....	83
Figura 3.24: Concentraciones de Cd en suelo vs Cd en agua .....	83
Figura 3.25: Concentraciones de Pb en suelo vs Pb en agua .....	84
Figura 3.26: Concentraciones V en suelo vs V en agua .....	84
Figura 4.1: Diagrama de flujo de modelación. Etapas de construcción de modelo de flujo y transporte (Schlumberger, 2009) .....	88
Figura 4.2: Mapa base. Área Urbana parroquia San Carlos .....	90
Figura 4.3: Precipitaciones medias mensuales (mm). Fuente: Estación Aeropuerto Coca (2008). ....	91
Figura 4.4: Evaporación mensual (mm). Fuente: Estación Coca – INAMHI	92
Figura 4.5: Creación de archivo de datos .....	98
Figura 4.6: Dominio de modelo.....	99
Figura 4.7: Área dominio del modelo .....	100
Figura 4.8: Malla modelo .....	101
Figura 4.9: Importación archivo puntos topografía San Carlos .....	102
Figura 4.10: Puntos de elevaciones en la malla .....	102
Figura 4.11: Curvas de nivel .....	103
Figura 4.12: Pozos de observación.....	104
Figura 4.13: Acuífero superior e inferior.....	104
Figura 4.14: Conductividad .....	105

Figura 4.15: Almacenamiento .....	105
Figura 4.16: Importación cotas nivel freático .....	106
Figura 4.17: Cotas de nivel freático en pozos de observación.....	106
Figura 4.18: Datos “pozo bombeo” Junta Parroquial .....	107
Figura 4.19: Condiciones de frontera para Río Huamayacu Estero Sapito	108
Figura 4.20: Río Huamayacu. Condiciones de borde aguas arriba.....	109
Figura 4.21: Río Huamayacu. Condiciones de borde aguas abajo .....	109
Figura 4.22: Estero Sapito condiciones de borde aguas arriba .....	110
Figura 4.23: Estero Sapito condiciones de borde aguas abajo .....	110
Figura 4.24: RMS normalizado = 1.561 % .....	111
Figura 4.25: Histograma calibración de residuales .....	111
Figura 4.26: Equipotenciales y direcciones de flujo agua subterránea .....	114
Figura 4.27: Dirección Del flujo de agua subterránea .....	115
Figura 4.28: Vista tridimensional nivel freático.....	116
Figura 4.29. Cadmio 365 días (1 año). .....	121
Figura 4.30. Cadmio 1825 días (5 años).....	121
Figura 4.31. Cadmio 3650 días (10 años).....	121
Figura 4.32. Cadmio 9125 días (25 años).....	122
Figura 4.33. Cadmio 18250 días (50 años).....	122
Figura 4.34. Cadmio 365 días (1año). .....	122
Figura 4.35. Cadmio 1825 días (5 años).....	123
Figura 4.36. Cadmio 3650 días (10 años).....	123
Figura 4.37. Cadmio 9125 días (25 años).....	123
Figura 4.38. Cadmio 1825 días (50 años).....	124
Figura 4.39. Níquel 365 días (1 año). .....	124
Figura 4.40. Níquel 1825 días (5 años).....	124
Figura 4.41. Níquel 3650 días (10 años).....	125
Figura 4.42. Níquel 9125 días (25 años).....	125
Figura 4.43. Níquel 14673 días (40.2 años).....	125
Figura 4.44. Níquel 18250 días (50 años).....	126
Figura 4.45. Níquel 365 días (1 año). .....	126
Figura 4.46. Níquel 365 días (1 año). .....	127

Figura 4.47. Níquel 3650 días (10 años).....	127
Figura 4.48. Níquel 9125 días (25 años).....	127
Figura 4.49. Níquel 14673 días (40.2 años).....	128
Figura 4.50. Níquel 18250 días (50 años).....	128
Figura 4.51. Plomo 365 días (1 año).....	131
Figura 4.52. Plomo 1825 días (5 años).....	131
Figura 4.53. Plomo 9125 días (25 años).....	131
Figura 4.54. Plomo 14673 días (40.2 años).....	132
Figura 4.55. Plomo 18250 días (50 años).....	132
Figura 4.56. Vanadio 365 días (1 año).....	132
Figura 4.57. Vanadio 1825 días (5 años).....	133
Figura 4.58. Vanadio 3650 días (10 años).....	133
Figura 4.59. Vanadio 9125 días (25 años).....	133
Figura 4.60. Vanadio 18250 días (50 años).....	134
Figura 4.61: Vanadio 365 días (1 año).....	134
Figura 4.62. Vanadio 1825 días (5 años).....	134
Figura 4.63. Vanadio 3650 días (10 años).....	135
Figura 4.64. Vanadio 9125 días (25 años).....	135
Figura 4.65. Vanadio 18250 días (50 años).	135
Figura 4.66. Concentración Cadmio versus tiempo. ....	136
Figura 4.67. Concentración Níquel versus tiempo. ....	136
Figura 4.68. Concentración plomo versus tiempo.....	137
Figura 4.69. Concentración Vanadio versus tiempo. ....	137
Figura 5.1: Rio Huamayacu y Estero Sapito .....	143
Figura 5.2: Mapa isoyetas del Ecuador. Fuente INAMHI, 2012 .....	145
Figura 5.3: Gradiente de variación de la precipitación media anual a lo largo de las provincias Napo y Orellana . Fuente Andrade, et al, citado por Villacrés (2010).....	145
Figura 5.4: Gradiente De evaporación anual a lo largo de las provincias Napo y Orellana . Fuente Andrade, et al, citado por Villacrés (2010). ....	1456

	15
Figura 5.5: Mapa Vertientes en río Huamayacu.....	148
Figura 5.6: Diferentes procesos de sorción (Appelo and Postma, 1993), citado por (Agua.uji.es, 2010) .....	151
Figura 5.7: Iones entre las láminas de arcillas. Fuente (Doronsoro Fernández, 2013).....	153
Figura 5.8: Distribución óxidos de hierro amorfos. Ubicación óxidos amorfos para un valor de pH=5.8 del subsuelo área urbana San Carlos. ....	153
Figura 5.9: Esquema genérico para plomo formando complejos con especies de hierro.....	161
Figura 5.10: Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales y oxianiones metálicos sobre hidróxidos de hierro amorfo (Manziona y Merrill, 1989) .....	156
Figura 5.11: Distribución de especies de vanadio. Ubicación de especies de vanadio para un valor de pH = 5.8 del subsuelo área urbana San Carlos .....	160
Figura 5.12: Esquema genérico para pH=5.8 de especies de hierro y vanadio .....	161



## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1. Valores de Kd para metales en estudio en función del pH. Fuente Loux et al, 1990, US EPA, 1995. ....	39
Tabla 1.2. Concentraciones en suelo y agua para Ni, Cd, Pb, V. Fuente CEINCI ESPE (2009). ....	40
Tabla 1.3. Cálculo de Kd para subsuelo área urbana San Carlos. ....	40
Tabla 2.1. Localización de los sondeos de refracción. ....	50
Tabla 3.1. Correspondencia geológica. ....	75
Tabla 3.2 Gravedad específica, porosidad .....	85
Tabla 3.3. Resultados de ensayos de bombeo para determinación de permeabilidades.....	88
Tabla 3.4 Aforos en el río Huamayacu.....	89
Tabla 3.5 Aforos en estero Sapito.....	89
Tabla 3.6. Profundidades del nivel freático en varias fechas .....	91
Tabla 3.7 Datos funcionamiento pozo agua subterránea de la Junta parroquial. ....	94
Tabla 3.8 Determinación general semicuantitativa de óxidos. ....	96
Tabla 3.9 Valores de concentración del Cadmio.....	97
Tabla 3.10 Valores de concentración del Níquel.....	98
Tabla 3.11 Valores e concentración del Plomo.....	99
Tabla 3.12 Valores de concentración del Vanadio.....	100
Tabla 3.13 Cálculo coeficientes de distribución para Níquel, Cadmio, Plomo y Vanadio. ....	82
Tabla 4.1 Evaporación. Fuente Estación Coca (2008).....	92
Tabla 4.2 Cálculo de recarga (filtración) .....	93
Tabla 4.3 Cotas de contacto entre estrato de limos y arcillas y basamento roca. ....	95
Tabla 4.4 Niveles de agua a partir del 2009-30-10 .....	96
Tabla 4.5 Propiedades hidráulicas del suelo .....	97
Tabla 4.6 Concentraciones en el suelo.....	118
Tabla 4.7 Coeficientes de distribución en función de pH .....	119
Tabla 4.8 Condiciones de borde en el Estero Sapito .....	119

Tabla 4.9 Tiempos control modelo.....	120
Tabla 5.1 Correspondencia geológica .....	138
Tabla 5.2 Valores orientativos de K para diferentes suelos. ....	149
Tabla 5.3 Contenidos máximos en suelo y agua de San Carlos.....	150
Tabla 5.4 Electronegatividades Plomo, Cadmio, Níquel, vanadio.....	154
Tabla 5.5 Parámetros aguas subterráneas en acuífero área urbana Parroquia San Carlos. Equipo utilizado: Multiparamétrico MX300.....	158
Tabla 5.6 Constantes de solubilidad kps. Fuente (slideshare, 2013).....	159
Tabla 5.7 Constantes de disociación ácida para especies de vanadio.....	159
Tabla 5.8 Concentraciones finales según modelo a un tiempo de 50 años	165

## **RESUMEN**

Se sabe que algunos acuíferos Oriente Ecuatoriano están contaminados con metales pesados provenientes de los hidrocarburos de la industria petrolera, por lo que en las zonas rurales cercanas a los campos explotación de petróleo, los colonos beben agua subterránea contaminada. La parroquia de San Carlos, provincia de Orellana, ha sido objeto de varios estudios relacionados con la contaminación por petróleo y las enfermedades asociadas. No obstante, ninguno de los estudios incluyó el análisis de las propiedades físico-químicas del subsuelo de la parroquia y de magnitud de las plumas de contaminación. El presente estudio caracteriza el subsuelo y las aguas subterráneas en la zona urbana de la población, contaminados con metales pesados Ni, Cd, Pb y V para posteriormente modelar su flujo y transporte en el subsuelo. El modelamiento se inicia con el análisis de la información de los resultados de las investigaciones de campo y de la literatura científica. Los datos de campo incluyen: i) sísmica de refracción para diagramar los espesores de las diferentes capas de suelo; ii) perforaciones para determinar la estratigrafía y clasificación de suelos; iii) medición del nivel freático del acuífero superior y iv) ensayos de bombeo para estimar los parámetros hidráulicos de los acuíferos, v) georreferenciación de los sitios de toma de muestras y de observación, vi) resultados de los ensayos de los químicos de los suelos. Se fija el periodo de simulación con un máximo de 50 años. Como resultados se obtienen modelos tridimensionales de flujo y transporte de los metales pesados mencionados con las correspondientes plumas de contaminación.

### **PALABRAS CLAVES:**

**METAL PESADO**

**CONTAMINACIÓN**

**MODELO**

**FLUJO**

**PLUMA**

## **ABSTRACT**

It is known that some East Ecuadorian aquifers are contaminated by heavy metals from the hydrocarbons of the petroleum industry, therefore in the rural zones near to the fields of oil exploitation, the colonists drink contaminated underground water. The parish of San Carlos, Orellana's province, has been a focus of several studies related to the pollution by oil and associated diseases. Nevertheless, none of the studies included the analysis of the physical-chemical properties of the parish subsoil and of the magnitude of pollution plumes. The present study characterizes the subsoil and the underground waters in the urban zone of the population, contaminated with heavy metals in order to shape the flow and transport of the heavy metals Ni, Cd, Pb, V in the subsoil. The modelling of flows and transport of heavy metals start with the analysis of the information based on the results of the field investigations and of the scientific literature. The field data includes: i) seismic of refraction to diagram the thickness of the different soil layers; ii) explorations to determine the stratigraphy and classification of soils; iii) measurement of the groundwater level of the superior aquifers and iv) pumping tests to estimate the hydraulic parameters of the aquifers, v) geo-referentiation of the sample collection sites and of observation, vi) results of the chemical tests of soils. After the field and laboratory data, it is proceeded by the modelling of the flow and transport of heavy pollutant metals Ni, Cd. Pb, V. The period of simulation is fixed by a maximum of 50 years. As a result is obtained the models of flow and transport of heavy metals mentioned with the corresponding plumes of three-dimensional pollution.

### **KEYWORDS:**

**HEAVY METAL**

**POLLUTION**

**MODEL**

**FLOW**

**PLUMA**

## **CAPITULO I**

### **FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES**

El agua se filtra en el subsuelo a través de los espacios vacíos interconectados y crea un flujo agua subterránea, al tener movimiento se convierte en medio de transporte de partículas de un sitio a otro. La diversidad de las partículas sufren un cambio cuando elementos ajenos a los componentes naturales de las fases del suelo, característicos de un sitio determinado se introducen desde el exterior por fenómenos a tróficos contaminantes. Una vez introducidos los contaminantes en el flujo pueden reaccionar o no dentro del medio al que invaden dependiendo de las condiciones del mismo.

Entonces nos enfrentamos a analizar en realidad, dos actos en el mismo escenario: Primero el movimiento del agua subterránea y segundo el movimiento del contaminante, cada fenómeno con sus propias reglas.

En este capítulo se explican las leyes y ecuaciones teóricas respecto al movimiento del agua subterránea, empezando con el ciclo hidrológico y los parámetros que caracterizan el movimiento del agua en los subsuelos. Luego se continúa con los mecanismos de transporte de los contaminantes, para al final analizar la constante de distribución de los metales pesados Ni, Cd, Pb, V.

Al final del capítulo de manera semejante se mencionan las ecuaciones que rigen el movimiento de los contaminantes.

#### **1.1 Flujo de Agua Subterránea**

##### **1.1.1 Las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico.**

El ciclo hidrológico incluye el movimiento del agua en todos sus estados (sólido, líquido y gaseoso) en particular en San Carlos por estar en una zona de alta precipitación.

La lluvia se precipita y sigue por superficie según la geomorfología del terreno o se infiltra hacia capas del subsuelo más bajas, otra parte es absorbida por las plantas y otra se evapora. "Se denomina ciclo hidrológico al movimiento general del agua ascendente por evaporación y descendente primero por precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea" (Sanchez San Roman, 2010).

Se puede suponer que el ciclo se inicia cuando una parte del vapor de agua se condensa dando origen a las lluvias, parte de ellas no alcanzan la superficie terrestre, ya que se evaporan en su caída o son interceptadas por la vegetación y devueltas a la atmósfera, al poco tiempo en forma de vapor (Sanchez San Roman, 2010)

Como se trata de un ciclo, se puede describir sus fases comenzando desde cualquiera de ellas:

a) La precipitación.- Caída del agua sobre la superficie de la tierra, espacios vacíos y plantas.

b) Evaporación.- Una parte se evapora desde la superficie del suelo, desde los ríos o lagos o también si ha quedado retenida sobre las hojas de los árboles.

c) Recarga por infiltración.- El agua que ingresa en el suelo, puede seguir tres caminos: 1) Evaporación, se evapora desde el suelo húmedo sin relación con la vegetación, 2) Transpiración, las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada en el suelo, una pequeña parte es retenida para su crecimiento y la mayor parte es transpirada, 3) El agua restante de esta infiltración da lugar al agua subterránea que forma parte de un acuífero..

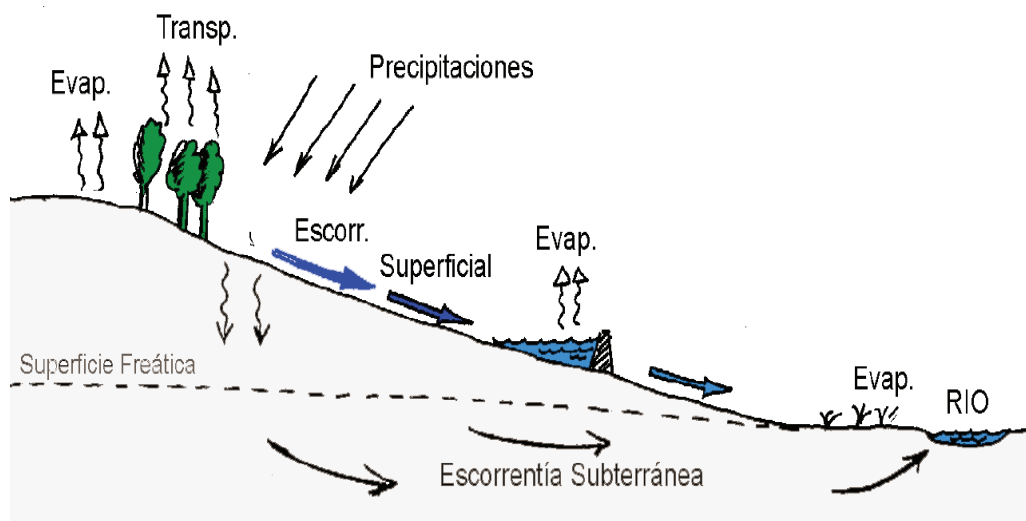
d) Escorrentía superficial.- El agua de las precipitaciones que no se evapora ni se infiltra, solo se escurre superficialmente, pero también con ella puede suceder varias cosas:

1) Una parte se evapora, desde la superficie de ríos, lagos y embalses, 2) Escorrentía directa, la que llega a los cauces superficiales en un período de tiempo corto después de la precipitación, 3) Escorrentía básica, la que alimenta los cauces superficiales en época estiaje, durante los períodos sin precipitación. La ecuación genérica de balance de agua está dada por:

$$\text{Precipitación} = \text{Evaporación} + \text{Recarga} + \text{Escorrentía} \quad (1)$$

De donde:

$$\text{Recarga} = \text{Precipitación} - \text{Escorrentía} - \text{Evaporación}$$



**Figura 1.1. Ciclo del agua. Fuente: Sánchez San Román. Hidrología**

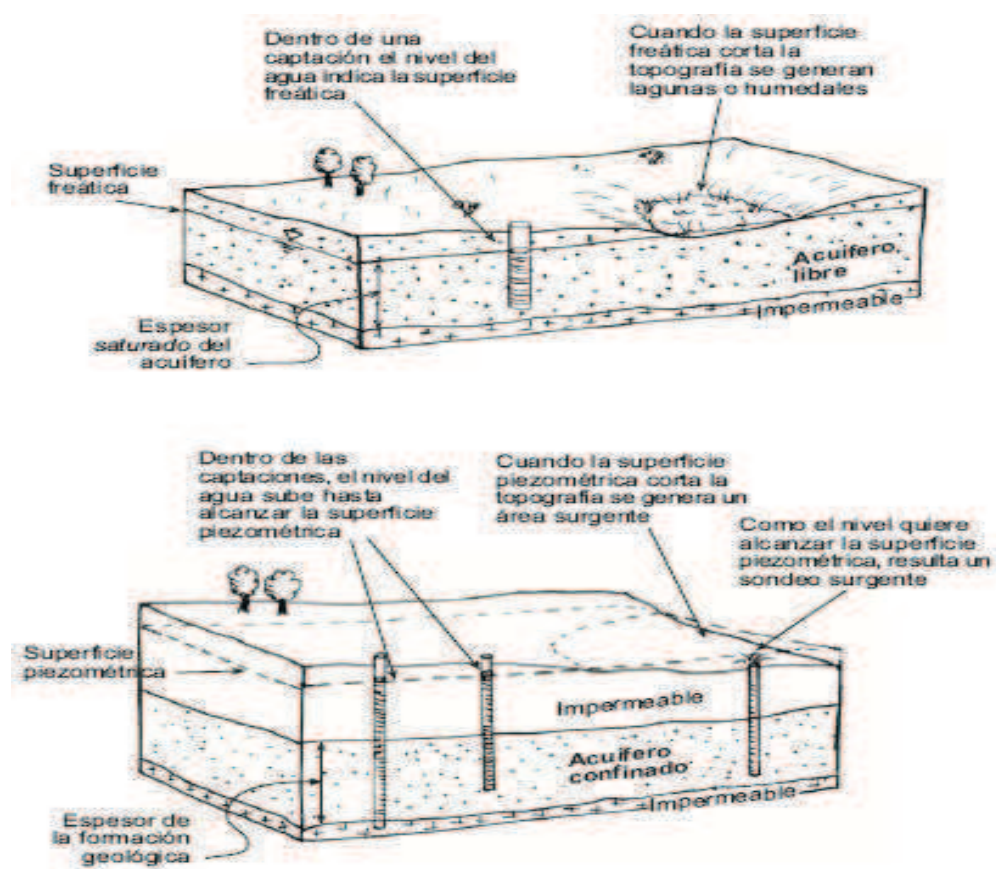
### 1.1.2 Acuíferos

Un acuífero es una formación geológica suficientemente permeable que contiene agua en cantidad apreciable y permite el almacenamiento y circulación subterránea a través de sus poros y grietas interconectadas. (González de Vallejo, 2006)

En la naturaleza existen varias clases de acuíferos dependiendo de su capacidad de conducir y almacenar agua.

***Tipos de acuíferos: libres y confinados.***

**Acuíferos libres.-** El agua se encuentra llenando parcialmente los poros o fisuras por acción de la gravedad, igual que el agua de una piscina llena el recipiente que lo contiene. La superficie del agua se denomina superficie freática, cuando esta superficie es cortada por un pozo se habla de un nivel freático en ese punto (Sanchez San Roman, 2010). El nivel freático se encuentra a la presión atmosférica y se comunica con la atmósfera a través de los espacios huecos del terreno permeable (Sanz Pérez & Menéndez Pidal, 2014)



**Figura 1.2. Tipos de acuíferos. Fuente: Sánchez San Román. Hidrología**

**Acuíferos confinados.-** La presión del agua es superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros y huecos en la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. La superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero se denomina superficie piezométrica, y en un punto o pozo se denomina nivel piezométrico.



Acuíferos semiconfinados.- Los materiales que los rodean no son todos impermeables y es clásico el esquema geológico donde existe una capa semipermeable (acuitardo) que separa un acuífero semiconfinado inferior con otro libre superior, permitiendo el paso de agua de uno a otro acuífero (Sanz Pérez & Menéndez Pidal, 2014)

### 1.1.3 Parámetros hidrogeológicos fundamentales

El flujo de agua y contaminantes en un acuífero dependen de las relaciones volumétricas de entre las fases del suelo – porosidad, la misma que a su vez es dependiente de la granulometría y compacidad que determinan un volumen de vacíos interconectados y la conductividad del agua produciendo el transporte o acumulación de solutos si es el caso.

#### **Porosidad $\eta$**

Considerando que el suelo saturado tiene tres fases, agua, aire y sólidos y el espacio ocupado por el agua más el aire conforma un volumen de vacíos, entonces la porosidad  $\eta$  es una relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de una unidad de suelo.

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad (2)$$

Dónde:  $V_v$  = volumen de vacíos

$V_t$  = volumen total

$V_s$  = volumen de sólidos

$V_t = V_v + V_s$

#### **Porosidad efectiva $\Theta$**

Del volumen de vacíos existente en el suelo, la porosidad efectiva toma solamente en cuenta los vacíos interconectados,  $V_e$ , por donde circularía el agua y una forma de medirlo es considerar el agua que puede ser liberada por gravedad comparada con un volumen total  $V_t$ . Se expresa en porcentaje.

$$\theta = \frac{V_e}{V_t} \quad (3)$$

### **Permeabilidad o conductividad hidráulica.**

La conductividad hidráulica  $K$  es una magnitud de dimensiones  $L/T$  (longitud/tiempo) que expresa la dificultad con la que un fluido es transportado por un medio poroso, por tanto es un coeficiente que depende tanto de las características del suelo como del agua.

En los suelos, las propiedades más importantes y que afectan a la permeabilidad son: el grado de compacidad, la granulometría, forma y tamaño de los granos, la superficie específica y la porosidad. La conductividad hidráulica se expresa como:

$$K = k \left( \frac{\rho g}{\mu} \right) \quad (4)$$

Dónde:  $K$  = conductividad hidráulica (Bedient, Rifai, & Newell, 1999)

$k$  = permeabilidad intrínseca y depende las propiedades del suelo

$\mu$  = viscosidad dinámica

$\rho$  = densidad del fluido

$g$  = constante gravitacional

En hidrología y mecánica de suelos, la permeabilidad (conductividad hidráulica,  $K$ ) es un concepto más preciso. Es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico.

$$\frac{\text{Caudal} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)}{\text{Sección} (\text{m}^2)} = K \frac{\Delta h (\text{m})}{\Delta l (\text{m})} \quad (5)$$

El caudal que atraviesa el medio poroso perpendicularmente a una sección es linealmente proporcional al gradiente hidráulico  $\Delta h (\text{m}) / \Delta l (\text{m})$ . La constante de proporcionalidad es la llamada permeabilidad (Sanchez San Roman, 2010).

### **Transmisividad $T$**

La transmisividad es un término utilizado en hidráulica subterránea aplicada a acuíferos confinados.

Se define como el producto de  $K$  que no es constante y el espesor del acuífero saturado  $b$  (Bedient, Rifai, & Newell, 1999), en un acuífero confinado su espesor es constante, luego la transmisividad también es una constante. En un acuífero libre su espesor saturado varía según la cota del nivel freático, con lo que varía también la transmisividad.

$$T = Kb \quad (6)$$

### ***Coefficiente de almacenamiento S***

El coeficiente de almacenamiento  $S$  es el volumen de agua liberado por una columna de base unitaria y con una altura igual a la del acuífero cuando el nivel piezométrico desciende una unidad.

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen total que ha bajado la superficie piezométrica}} \quad (7)$$

Los valores típicos son:

Acuíferos confinados: 0.3 a 0.01 ( $3 \times 10^{-1}$  a  $10^{-2}$ )

Acuíferos semiconfinados:  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$

Acuíferos libres:  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$

### **1.1.4 Ecuaciones fundamentales del flujo de aguas subterráneas**

En el subsuelo el agua subterránea está presente como parte del ciclo hidrológico, pero el flujo de la misma está condicionado a la existencia de un gradiente hidráulico y éste a su vez a la existencia de una carga hidráulica o una diferencia de presiones entre dos sitios diferentes desde y hasta donde se traslada el agua, al no existir el gradiente el hidráulico, simplemente el agua no se desplaza.

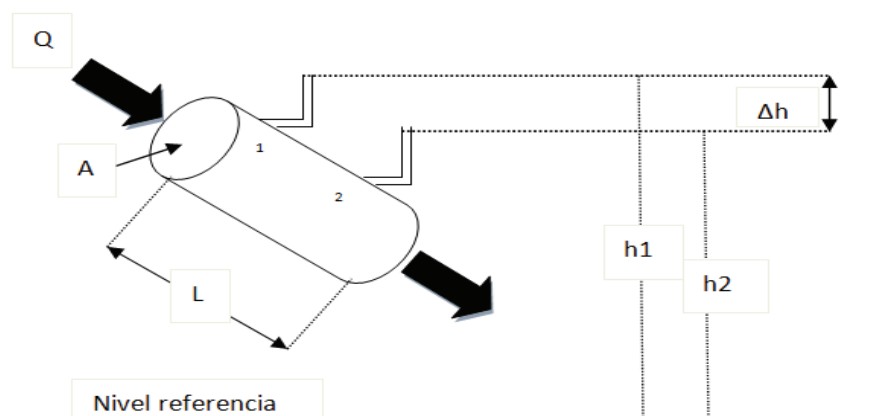
Es difícil concebir la idea física del flujo subterránea más cuando la velocidad de desplazamiento entre los poros del suelo es muy baja, sin embargo es muy claro que debido a las grandes extensiones de las formaciones geológicas en área y en profundidad los volúmenes de agua subterránea también son grandes.

A continuación se exponen la ley de Darcy y los modelos numéricos de transporte de solutos en aguas subterráneas

### ***Ley de Darcy***

El flujo de agua subterránea es controlado por dos propiedades de suelo: la porosidad y la permeabilidad. La porosidad determina la cantidad de agua que puede contener el suelo. En sedimentos o rocas sedimentarias, la porosidad depende del tamaño de grano, forma de grano, el grado de cimentación. La permeabilidad en cambio es una medida del porcentaje de los espacios porosos que están interconectados, y el tamaño de estas interconexiones (Lenth, 2010).

La velocidad a la que el agua subterránea se mueve a través de la zona saturada depende de la conductividad hidráulica de la roca y el gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico se define como la diferencia en elevación del terreno dividido para la distancia entre dos puntos del nivel freático (Braja M., 2007). La velocidad de Darcy,  $v$ , es entonces:



**Figura 1.3. Ley de Darcy**

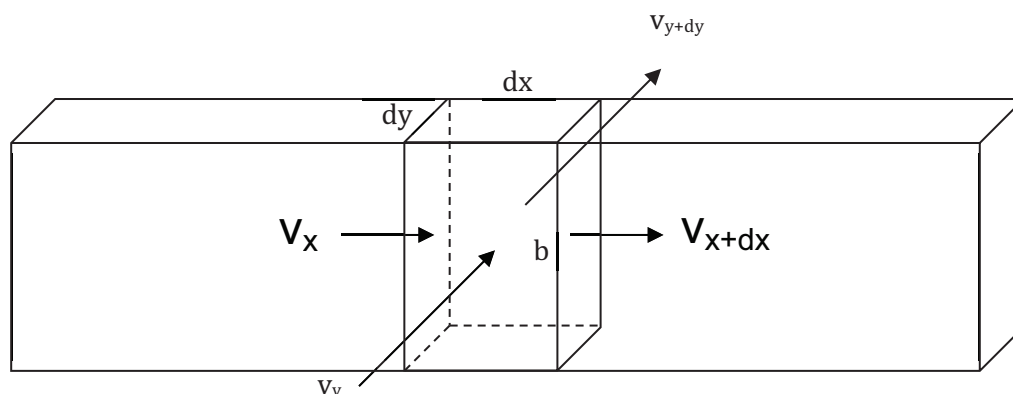
$$v = K \frac{(h_2 - h_1)}{L} \quad (8)$$

Donde K es la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad,  $h_1$  y  $h_2$  las cargas hidráulicas en los puntos 1 y 2 y L la longitud entre los puntos. Si se multiplica la Ec. 1 por el área A perpendicular al flujo de agua, entonces el caudal, Q, está dado por:

$$Q = AK \frac{(h_2 - h_1)}{L} \quad (9)$$

### ***Balance de entrada y salida***

La ecuación que gobierna el flujo de agua en el interior de los acuíferos, se obtiene del balance de agua a la entrada y la salida del diferencial de volumen de un acuífero como se observa en la Figura 2. 4.



**Figura 1.4. Sección de un acuífero**

Por balance de agua, se tiene que:

$$\rho v_x b dy + \rho v_y b dx - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x b dy) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y b dx) \right] + W_{EN} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( b K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( b K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{W_{EN}}{\rho dx dy} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11)$$

Dónde:

$\rho$  = densidad del líquido, kg/m<sup>3</sup>

$b$  = espesor del acuífero, m

$K_x$  = conductividad hidráulica en la dirección  $x$ , m/d

$K_y$  = conductividad hidráulica en la dirección  $y$ , m/d

$W_{EN}$  = recarga vertical, kg/d

$S$  = coeficiente de almacenamiento

$h$  = carga hidráulica, m

$t$  = tiempo, d

La transmisividad en las direcciones  $x$  y  $y$  está dada por:

$$T_x = bK_x \quad T_y = bK_y \quad (12)$$

De manera que la Ec. 5 se transforma en:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W_{EN} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (13)$$

Si el suelo es isotrópico homogéneo y no existe recarga vertical, la Ec. 13 reduce a:

$$T \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (14)$$

La Ec. 14 es bidimensional en flujo y se puede resolver con métodos analíticos, numéricos o empleando paquetes computacionales.

### ***Transporte de contaminantes.***

Los contaminantes son encontrados en la subsuperficie en varias fases. Los que están disueltos en el agua son los solutos y el agua es el solvente. La trayectoria del flujo de agua que acarrea contaminantes disueltos en su paso por un medio poroso se observa en la Figura 2.5.

A medida que el agua fluye, los contaminantes disueltos son transportados. Este mecanismo de transporte se llama advección, que es el transporte de solutos a lo largo de las líneas de flujo a la velocidad promedio

del poro. A escala macroscópica, el medio poroso gobierna el flujo y dirección. Sin embargo, a nivel microscópico, el medio poroso está compuesto de partículas sólidas discretas y los espacios vacíos o poros. El agua no fluye a través de las partículas sólidas sino alrededor de ellas por medio de la interconexión de poros. La ecuación para modelar la advección es:

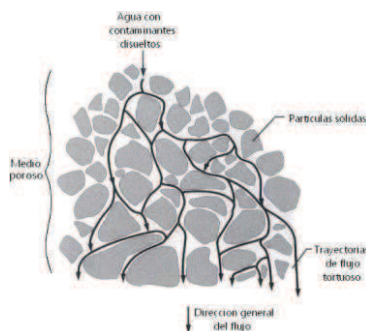
$$F_x = \theta \bar{v}_x C \quad (15)$$

Dónde:  $F_x$  = flujo en la dirección  $x$ ,  $g/s \cdot m^2$

$v_x$  = velocidad de Darcy en la dirección  $x$ ,  $cm/s$

$\Theta$  = porosidad efectiva, %

$C$  = concentración del contaminante,  $mg/L$



**Figura 1.5: Esquema de la dispersión mecánica**

**Fuente: (Bedient, Rifai, & Newell, 1999)**

El flujo de agua luego de encontrarse con las partículas sólidas del medio poroso debe alterar su curso y fluye alrededor de los sólidos tanto a la derecha o izquierda del sólido o disipándose o migrando a los dos lados. Esta acción se repite millones de veces y con millones de partículas de agua. El resultado es una mezcla del agua que fluye mediante dispersión hidrodinámica. La dispersión se calcula con la siguiente relación:

$$F_x = -\theta D_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (16)$$

Dónde:

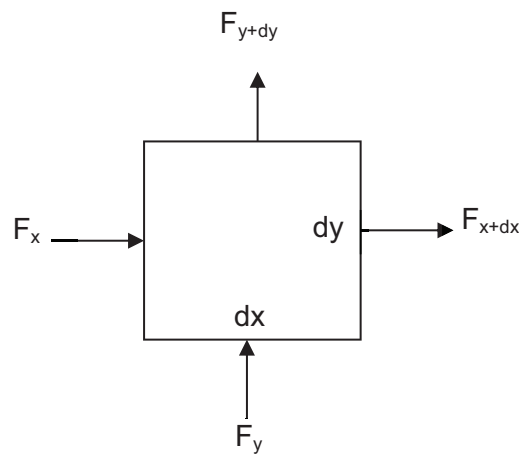
$D_x$  es el coeficiente de dispersión en la dirección  $x$ ,  $m^2/s$

El flujo total de contaminante en la dirección x es entonces:

$$F_x = \theta \bar{v}_x C - \theta D_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (17)$$

En forma similar, el flujo en la dirección y es:

$$F_y = \theta \bar{v}_y C - \theta D_y \frac{\partial C}{\partial y} \quad (18)$$



**Figura 1.6: Volumen de control bidimensional**

El balance de masa para el volumen de control representado en la Figura 2.6 es el siguiente:

$$F_x dy \cdot 1 + F_y dx \cdot 1 - (F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx) dy \cdot 1 - (F_y + \frac{\partial F_y}{\partial y} dy) dx \cdot 1 \pm r (\theta dx dy \cdot 1) = \theta dx dy \cdot 1 \frac{dC}{dt} \quad (19)$$

$$-\frac{\partial F_x}{\partial x} - \frac{\partial F_y}{\partial y} \pm r \cdot \theta = \theta \frac{dC}{dt} \quad (20)$$

Reemplazando los flujos en las dos direcciones, y si no existe reacción r la última ecuación se convierte en:

$$\left[ D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] - \left[ \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (21)$$



Esta es una ecuación bidimensional en flujo y en transporte. Las formas de resolver la ecuación son analíticas, numéricas o empleando un software especializado.

***Paquete computacional para resolver el problema de flujo y transporte de contaminantes.***

El software VISUAL MODFLOW (Schlumberger, 2005) es una aplicación numérica del modelo conceptual del flujo y transporte de contaminantes utilizando la técnica de diferencias finitas. El paquete resuelve sistemas de ecuaciones de flujo de agua en acuíferos. La ecuación de flujo gobernante para una sustancia conservativa tiene la forma de:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W(x, y, z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (22)$$

La solución de la Ec. 22 depende de las condiciones iniciales y condiciones de borde.

La carga hidráulica inicial:  $h(x, y, z, t) = h(x, y, z, 0)$ , es el nivel freático del acuífero (Anderson & Woessner, 1992). Las condiciones de borde pueden ser:

Carga hidráulica constante  $\frac{\partial h}{\partial x} = \text{constante}$  (Condición de Dirichlet) (23)

Frontera impermeable,  $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$  (Condición de Neumann) (24)

En cambio, la ecuación bidimensional de flujo y de transporte incluidos sorción y biodegradación es:

$$\left[ D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] - \left[ v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] + K_L a (C - C_{eq}) - \frac{k_{max} C}{K_c + C} X = \left( 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} \right) \frac{\partial C}{\partial t} \quad (25)$$

Dónde:

$K_L$  = coeficiente de transferencia de masa, m/s

$a$  = área superficial/volumen,  $m^2/m^3$

$C_{eq}$  = concentración del contaminante en equilibrio, mg/L

$K_C$  = coeficiente de saturación media, mg/L

$K_{max}$  = constante máxima de utilización del contaminante, mg sustrato/mg

$\rho_b$  = densidad en el seno del sólido,  $kg/m^3$

$K_d$  = coeficiente de separación suelo/agua, L/kg

$\Theta$  = porosidad

## 1.2 Mecanismos de Transporte de Contaminantes

A continuación se describen los mecanismos de transporte de los contaminantes a través de medios porosos (Tobar Martín, 2011). El proceso de transporte que interesa analizar es de los metales pesados Ni, Cd, Pb y V como elementos contaminantes, mismo que puede ocurrir por los siguientes mecanismos: Advección, dispersión, difusión, sorción, adsorción.

### 1.2.1 Advección

La advección consiste en el transporte de contaminantes que se mueven con el agua y la velocidad de ésta y a través de un medio poroso. Según la ley de Darcy la velocidad del fluido puede estimarse según la fórmula:

$$V_f = K \frac{i}{\eta_e} \quad (26)$$

Dónde:

$V_f$  = velocidad del fluido (m/d)

$K$  = conductividad hidráulica (m/d)

$i$  = gradiente hidráulico (m/m)

$\theta_e$  = Porosidad efectiva del suelo

### 1.2.2 Dispersión

Es el mecanismo de mezcla causado por la variación natural del tamaño de los poros dentro del suelo y en distintas direcciones lo que provocan cambios en la velocidad y en las direcciones del flujo, debido a: diferentes longitudes de caminos que puede recorrer el fluido, diferencias de velocidad entre espacios vacíos intercomunicados debido a la diferencia en el tamaño de los poros, diferencias de fricción en los espacios vacíos

intercomunicados. Las partículas de fluido cercanas a los granos del suelo se moverán a menor velocidad que las que circulan en el espacio libre entre de los granos.

Este mecanismo provoca un incremento del tamaño de la pluma y una disminución en la concentración del contaminante.

### 1.2.3 Difusión

La difusión es el proceso de transporte de contaminantes a escala molecular, debido a la existencia de un gradiente molecular, que causa el movimiento de los solutos de las zonas de mayor concentración a las de menor concentración. En una dimensión se describe mediante la ley de Fick:

$$m_x = -Dd \frac{\partial c}{\partial x} \quad (27)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} m_x &= \text{flujo de masa (Kg/m}^2\cdot\text{s)} \\ Dd &= \text{coeficiente de difusión (m}^2\text{/s)} \\ \frac{\partial c}{\partial x} &= \text{gradiente de concentración} \end{aligned}$$

Puede ser el mecanismo de transporte dominante en aquellos casos en que la advección sea insignificante (con velocidades del fluido muy pequeñas), pero en la mayoría de los casos puede ser despreciado respecto a la advección.

### 1.2.4 Sorción

Cuando un contaminante se asocia con la fase sólida, no se puede determinar si está adsorbida en la superficie del sólido, absorbido en la estructura del sólido, precipitado como una estructura tridimensional en la superficie del sólido o particionado en la materia orgánica (Tobar Martín, 2011)

Sorción es el término general que se utiliza para referirse a todos los procesos relacionados con la partición del contaminante entre la fase líquida

y la sólida. Este proceso provoca un retardo del transporte del contaminante respecto a la velocidad del fluido que se cuantifica mediante el coeficiente de partición (o de distribución)  $K_d$ , que relaciona la concentración del contaminante en la fase sólida con la concentración presente en la fase acuosa.

En el caso de los metales los procesos de adsorción y de precipitación son considerados los más importantes

### **1.2.5 Adsorción**

La adsorción consiste en la acumulación de una sustancia en la interface entre una superficie sólida y la solución en contacto con ella. Se diferencia de la precipitación en que no incluye la formación de una estructura tridimensional sino que la materia se acumula bidimensionalmente en la interface. Se conoce como adsorbato al material acumulado en la interface, adsorbtivo a la molécula o ión en disolución susceptible de ser adsorbido.

Este proceso es fundamentalmente dependiente del pH, ya que la magnitud y la polaridad de la carga superficial de los componentes minerales del suelo varían con los cambios de pH. La adsorción de aniones disminuye al incrementarse el pH ya que está ligada a la liberación de iones hidroxilo, mientras que la de cationes disminuye al disminuir el pH al estar ligada a la liberación de protones.

Los procesos de adsorción / desorción son el mecanismo más determinante en el transporte de contaminantes inorgánicos especialmente en áreas donde los constituyentes naturales del suelo están en equilibrio, como en áreas lejanas a la fuente contaminante.

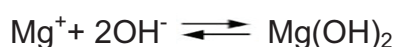
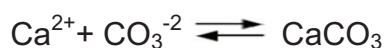
### **1.2.6 Desorción**

El proceso de desorción consiste en la liberación del contaminante asociado con la fase sólida y su vuelta a la fase acuosa. No todo el soluto que es adsorbido es luego desorbido, es decir, el proceso es irreversible, de

manera que las curvas de adsorción / desorción presentan histéresis. Esto supone que considerar el proceso como reversible es una opción conservadora en lo que respecta al transporte del contaminante a través del acuífero, ya que no toma en cuenta que una parte puede quedar retenida en la fase sólida y no liberarse.

### 1.2.7 Intercambio iónico

El intercambio iónico es una de las reacciones más comunes en los suelos. Este proceso implica el cambio de una especie iónica presente en la fase sólida por otra especie iónica, procedente de la solución acuosa en contacto con el sólido. Los procesos de intercambio iónico pueden incluirse dentro del concepto de adsorción y cuantificarse también mediante el coeficiente de distribución  $K_d$  como puede verse en las reacciones.



### 1.2.8 Precipitación

Es el proceso mediante el cual se desarrolla un mecanismo de crecimiento en tres dimensiones, pudiendo entenderse como una adsorción llevada al extremo, cubriendo toda la superficie del sólido y creando una estructura tridimensional.

Los procesos de precipitación / disolución suelen ser los más importantes en condiciones de no – equilibrio, como en las proximidades de la fuente, donde existen grandes cantidades de contaminante o fuertes gradientes de pH o potencial rédox.

### 1.2.9 Modelos de sorción

El método más utilizado para estimar el retardo del contaminante debido a la sorción se basa en el coeficiente de distribución o partición  $K_d$ , definido anteriormente.

Existen varios modelos para determinar el valor de este coeficiente

### **Kd constante**

El coeficiente de distribución Kd constante es una medida de la sorción definida como la relación entre la cantidad de contaminante presente en la fase sólida respecto a la presente en la fase acuosa, considerando que en el caso de los metales, los procesos de adsorción y de precipitación son los considerados los más importantes se tiene la relación: (EPA, August, 1999)

$$Kd = \frac{C_s}{C_w} \quad (28)$$

Dónde:

Kd = coeficiente de distribución del contaminante

$C_s$  = concentración del contaminante en la fase sólida (L/Kg)

$C_w$  = concentración del contaminante en la fase acuosa (mg/L)

Los valores de Kd se determinan empíricamente y son válidos solo para las condiciones y componentes en las que han sido determinados, por ejemplo a un determinado pH y tipo de suelo. A pesar de esta limitación el modelo de Kd constante es ampliamente utilizado en los modelos de transporte de contaminantes debido a su facilidad de incorporación en las ecuaciones advectivas – dispersión mediante un factor de retardo (R)

### **Factores de retardo (R)**

El factor de retardo se define como la relación entre la velocidad de transporte del contaminante respecto a la del fluido, determinado por la interacción química entre este y el material geológico:

$$R = \frac{V_f}{V_c} \quad (29)$$

Dónde:

$V_f$  = velocidad del fluido (m/d)

$V_c$  = velocidad del contaminante (m/d)

Al considerar que el fenómeno de Sorción es lineal, reversible, instantáneo y que las condiciones del acuífero son constantes puede incluirse en los modelos de transporte de contaminantes mediante la ecuación:

$$R = 1 + \frac{\rho_b \cdot K_d}{\theta_e} \quad (30)$$

Dónde:

$\rho_b$  = densidad del suelo (Kg/L)

$\theta_e$  = porosidad efectiva

Debido a que los valores de  $K_d$  varían según las condiciones geoquímicas del subsuelo o del agua, en la literatura se encuentran rangos de valores, pudiéndose escoger valores máximos, mínimos o intermedios. La opción más conservadora para considerar el riesgo debido a la migración de los contaminantes a través del agua subterránea es asumir un valor mínimo del  $K_d$ .

Existen otras formas para determinar  $K_d$ , pero que requieren de un mayor volumen de datos geoquímicos como son las isotermas de adsorción:

Isotermas de adsorción.- Son expresiones que relacionan la cantidad de elemento adsorbido en la masa de suelo, respecto a la concentración de contaminante en el agua. Dos de los modelos más utilizados son: las isotermas de Langmuir y Freundlich. Esta última tiene la siguiente forma:

$$C_s = K_d \cdot C_w^n \quad (31)$$

Cuando  $n = 1$ , se trata de un isoterma lineal que coincide con el modelo de un  $K_d$  constante.

### 1.3 Coeficientes de Distribución en los Metales Cd, Ni, Pb, V

Los valores de  $K_d$  para los metales dependen de muchas variables siendo las más importantes: pH, condiciones redox, contenido de óxidos de hierro, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico. El elevado número de variables, su variabilidad y las diferencias entre los diferentes métodos experimentales resultan en un amplio rango de valores de  $K_d$  para cada metal. El parámetro más influyente es el pH.

### 1.3.1 Valores de $K_d$ en función del pH.

Para el análisis de riesgo, la US EPA propone los valores de  $K_d$  estimados en función del pH que se muestran en la Tabla No 1, en la cual se ha calculado un  $K_d$  en función de un valor promedio de pruebas de campo con  $\text{pH} = 5.87$  para el suelo, debe anotarse que la EPA no da una formulación para el caso del Vanadio (V).

**Tabla 1.1.**

**Valores de  $K_d$  para metales en estudio en función del pH. Fuente Loux et al, 1990, US EPA, 1995.**

Metal	ml/g	$K_d$ (Para $\text{pH} = 5.87$ ) L/mg
Cadmio	$K_d = 100.397 \cdot \text{pH} - 0.943$	24.4
Níquel	$K_d = 100.332 \cdot \text{pH} - 0.471$	30.04
Plomo	$K_d = 100.0786 \cdot \text{pH} + 1.55$	100.18

### 1.3.2 Valores considerando un coeficiente de distribución $K_d$ constante.

Al considerar un coeficiente de distribución constante y tomando en cuenta que resulta de la relación de concentración adsorbida en la parte sólida comparada con la concentración en la parte líquida, entonces se puede tomar en cuenta un estudio anterior en el área de San Carlos que facilite el cálculo de  $K_d$  de un manera muy simple y con datos reales del sitio (ver Tabla 1.2).



Teóricamente se puede calcular un Kd tomando en cuenta las concentraciones en el agua y el suelo para una muestra. Para este estudio se tienen varias muestras cada una con sus concentraciones por lo que se ha optado por reunir a todos y hallar un valor promedio como representativo. Como se verá los valores son numéricamente bajos en Tabla 1.3.

**Tabla 1.2.**

**Concentraciones en suelo y agua para Ni, Cd, Pb, V. Fuente CEINCI ESPE (2009).**

Pozo	Niquel		Cadmio		Plomo		Vanadio		pH agua
	Suelo	Agua	Suelo	Agua	Suelo	Agua	Suelo	Agua	
P2D		0,003		0,0002		0,0002		0,002	6,28
P5D		0,00021		0,0002				0,0017	6,39
P6D									6,34
P7D		0,00036				0,0002		0,0028	7,08
P8D		0,0008							6,45
P9D		0,0008	0,38	0,0002		0,0002		0,0027	6,6
P10D	0,005		0,14		16		130		5,6
P12D	26		0,1				140		6,06
P13D	0,2		0,38		11		110		6,32
P14D	0,1		0,38		21		140		6,35
P16D		0,00034	0,0002		0,0002	0,0002		0,0006	7,1
P17D									8
P18D		0,00025		0,0002		0,0002		0,002	6,55
P19D									6,64
P20D									6,55
P21D	15		0,5		11		127		6,09
P22D									6,48
P01									
P03									6,68
P04		0,004		0,0002		0,0005		0,0027	6,78
P05		0,00021				0,0002		0,0017	5,64
P06									6,39
P07									7,08
P08									
P09									6,99
P10									5,8
P11				0,0002					6,46
P12					21	0,0003			6,06
P23		0,0022	0,0002					0,0021	6,93
P24		0,002		0,0002		0,0002		0,0036	6,51
P25		0,0031		0,0002		0,0026		0,017	
P26		0,001		0,0002		0,00052		0,0038	
P27		0,0021		0,0002		0,00078		0,01	
P28		0,0051		0,0002		0,0013		0,01	
P29		0,0036		0,0002		0,00063		0,0049	
P30		0,0028		0,0009		0,029		0,091	
P31		0,0038		0,0004		0,0064		0,042	
Prom	8,261	0,00198	0,23505	0,00026	13,3334	0,00271	129,4	0,0118	6,50714

**Tabla 1.3.**

**Cálculo de Kd para subsuelo área urbana San Carlos.**

	Niquel		Cadmio		Plomo		Vanadio		pH agua
	Suelo	Agua	Suelo	Agua	Suelo	Agua	Suelo	Agua	
Kd(L/mg)	0,0042		0,00089		0,0049		0,011		6.51

#### 1.4 Caracterización de los suelos y aguas subterráneas

La caracterización de un área de estudio constituye la determinación de los parámetros físicos químicos y biológicos junto con el estado de las fases del suelo, incluidos los contaminantes, peculiares de ésta área y que la distinguen claramente de cualquier otra.

La caracterización (Sánchez Pachón, 2003) clásica de los suelos contaminados incluye la toma de muestras y su envío a diferentes laboratorios para su análisis. El empleo de técnicas de campo, cuya aplicación no supone grandes costos y que permiten la toma de la muestra y su análisis (físico o químico) puede proporcionar una aproximación a la situación real del terreno (Sánchez Pachón, 2003). Para ello, antes de la toma de muestras, es necesario delimitar en el subsuelo el volumen contaminado para minimizar los costos de caracterización.

Según Madrid (2002), la investigación que tiene como objetivo la caracterización de fosas petroleras y sitios contaminados por crudo a través de métodos geofísicos y sensores geoquímicos (medida de química superficial) in situ, reduce al máximo la toma de muestras mediante sondeos a diferentes profundidades.

Por otra parte, se emplean modelos de transporte y distribución de contaminantes (principalmente hidrocarburos, sales y metales) en el subsuelo y también técnicas geofísicas de superficie (magnetismo, electromagnetismo, resistividad), junto a técnicas de espectrometría de rayos gamma y métodos geoquímicos de detección y análisis in situ. También se propone una secuencia operativa de adquisición e integración de datos para la caracterización de fosas. Como conclusión se puede decir que los estudios in situ, los ensayos de laboratorio y modelos teóricos de

parámetros geofísicos – geoquímicos de contaminantes en el subsuelo permitirán junto a una inversión apropiada simular las condiciones e interpretar los resultados.

En Chile, Bastidas Celi (2009), investiga la contaminación de subsuelo y agua subterránea por efectos de fugas, derrames e inyecciones de (NAPL) hidrocarburos líquidos en fase no acuosa, sin embargo la técnica de determinación del área contaminada radica principalmente en la caracterización por toma de muestras y su posterior transporte a laboratorios. Concluye, la investigación, que la normativa chilena debe modificarse para exigir que los tanques de almacenamiento en las estaciones de servicio no sean de pared simple sino doble y reforzada.

En México, Saval (2000), estudia arcillas contaminadas con gasolina, diésel y propone un remediación física y química. La caracterización se lo realiza principalmente por muestreo mediante perforaciones.

Granda (1998), realiza un análisis con técnicas geofísicas para el estudio de contaminación de aguas subterráneas hasta profundidades de 60 m con vertidos de origen industrial o urbano. Se aborda el tema de la contaminación por hidrocarburos con la limitada utilidad de los métodos geofísicos, sin descartar el muestreo para análisis químico posterior

De las investigaciones anotadas se puede concluir lo siguiente: existe una tendencia hacia la utilización de métodos como la geofísica, resistividad y georadares para la localización in situ de plumas de contaminación con hidrocarburos de aguas subterráneas antes de la toma de muestras. Por otra parte, se debe considerar la adopción de metodologías de campo mucho más baratas para la caracterización de un acuífero contaminado, la localización de la pluma de contaminación y el establecimiento de un plan de remediación.

Se conoce que la zona de San Carlos ha sido sometida a varios estudios de contaminación superficial, epidemiológicos, etc, pero ninguna ha

caracterizado la contaminación de la subsuperficie y de las aguas subterráneas.

En este contexto, los objetivos del presente estudio son:

Objetivo principal del estudio:

Realizar un modelo de flujo y transporte de los metales pesados Ni, Cd, Pb y V presentes en el acuífero superior ubicado en el subsuelo de la zona urbana de la parroquia San Carlos Provincia de Orellana, para ello se identificarán las características propias de este subsuelo y de las aguas subterráneas someras presentes en el mismo.

Objetivos específicos

Caracterizar físicamente el subsuelo mediante sondeos con recuperación de muestras para su clasificación según SUCS según ensayos de laboratorio con determinación de su textura.

Estimar las propiedades geohidráulicas del acuífero usando datos de pruebas de bombeo y relaciones empíricas.

Analizar los datos de caracterización química del subsuelo y de las aguas subterráneas para emplearlos en la calibración del modelo.

Determinar en el campo las condiciones de borde del área de estudio.

Establecer la dirección del flujo de las aguas subterráneas de la zona urbana de San Carlos, usando un paquete computacional especializado.

Simular escenarios de contaminación con metales pesados Ni, Cd, Pn y V en el subsuelo y aguas subterráneas de la zona de San Carlos. Para establecer la extensión de las plumas de contaminación.

Calibrar los escenarios con los datos de campo usando un paquete computacional y determinar el escenario óptimo para una posterior remediación.

Elaborar mapas de contaminación con los metales pesados antes mencionados en el acuífero superior a Escala 1:2000.

## **CAPITULO II**

### **METODOLOGÍA, ENSAYOS DE CAMPO, LABORATORIO**

En este capítulo se explica la metodología para la recolección de datos necesarios para construir un modelo conceptual en el que se puedan distinguir las condiciones de campo tanto del subsuelo como en la identificación apropiada de la estratigrafía y la profundidad del agua subterránea, con el propósito de que se puedan simplificar las condiciones hidrogeológicas existentes y las condiciones de contorno en el subsuelo del área urbana de la parroquia San Carlos.

En primera instancia se conducen los ensayos de campo en una superficie de 22 Has que correspondientes al área urbana de la población de San Carlos.

Al no conocer la estratigrafía del subsuelo fue necesario calcular una primera aproximación de los espesores de cada estrato, para ello se utiliza el ensayo de sísmica de refracción. Con esta técnica desde la superficie se puede realizar una tomografía del subsuelo y estimar estratigrafía y espesores de los estratos mediante la correlación de las velocidades de transmisión de ondas longitudinales en los mismos.

Luego se realizaron sondeos de exploración mediante perforaciones que alcanzaron diferentes profundidades. Con este método se recuperaron muestras de suelo y agua, las primeras se utilizaron para ensayos de laboratorio con el fin de clasificar el suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), las muestras de agua para determinar pH.

Con estos resultados se definen los tipos de suelo según la profundidad de cada sondeo, esto a su vez permite definir la estratigrafía del subsuelo del área urbana de San Carlos con los correspondientes espesores de cada estrato.

## 2.1 Trabajo de Campo

### 2.1.1 Sísmica de refracción.

#### 2.1.1.1 Sísmica de refracción, principio teórico.

La sísmica de refracción es un método de prospección geofísica utilizado para determinar fronteras sísmicas entre los estratos o materiales geológicos con propiedades físicas diferentes. Geométricamente estas fronteras pueden ser horizontales, inclinadas o verticales. Físicamente los materiales pueden tener variada litología, contextura, estructura, estado de saturación, grado de alteración, etc y con diferentes características físicas.

Las fronteras sísmicas se determinan de acuerdo al cambio de las propiedades físicas en estratos de los suelos (en el presente caso de la velocidad longitudinal o compresional), donde se produce el fenómeno de la refracción total y que constituye la base de la teoría física del método.

El método de sísmica de refracción es indirecto y consiste en generar un campo sísmico artificial mediante la detonación de una carga explosiva o por golpes de martillo y medir los tiempos que las ondas se demoran en llegar a los receptores o geófonos, distribuidos en la superficie del terreno, Figura 2.1.

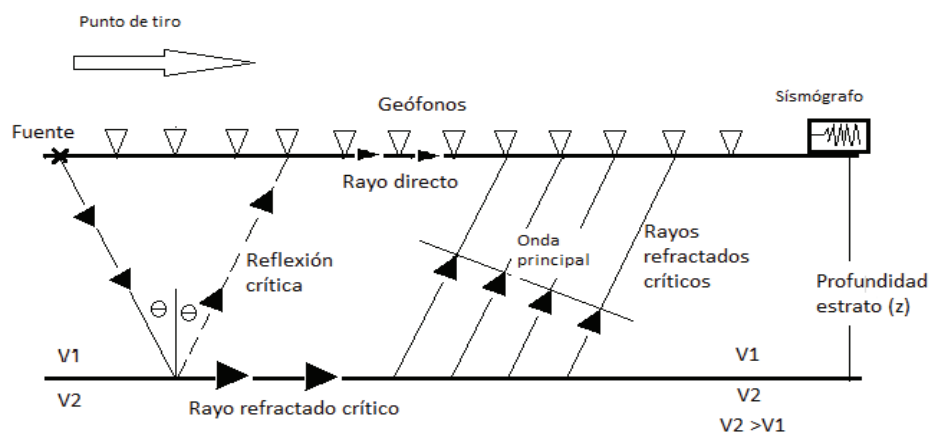


Figura 2.1: Ensayo sísmica de refracción

De manera que se obtienen en superficie los tiempos de llegada de las ondas refractadas por las diferentes fronteras, de suelo, en profundidad y luego se las representa gráficamente en coordenadas (x,y). Con los tiempos de llegada de las primeras ondas longitudinales versus la distancia en el terreno, se obtiene un conjunto de curvas tiempo-distancia conocidas como dromocronas que son la base gráfica que permite determinar los espesores de las capas y las velocidades longitudinales propias de cada suelo.

El principio físico de la sísmica de refracción debe cumplir ciertos requisitos, uno de ellos (el principal) consiste en que en el subsuelo se produzca un incremento de la velocidad compresional con la profundidad, de acuerdo al incremento de las condiciones de compacidad o consistencia en suelos y menor fracturación o menor alteración en rocas (a menor velocidad mayor alteración y fracturamiento de la roca), condición que permite la refracción total y permite la utilización del método.

La sísmica de refracción, en esencia, es un ensayo de campo ejecutado desde la superficie del suelo y permite tener una representación de la estratigrafía del subsuelo por medio del cálculo de las velocidades de flujo de ondas de sonido refractadas en los contactos de capas de suelos con diferente compacidad o rocas de diferentes resistencias. El rango de velocidades permite el cálculo de los espesores de los estratos y también definir el tipo de suelo o roca en forma razonablemente aproximada.

#### ***2.1.1.2 Metodología ensayo de refracción sísmica***

##### **Equipo utilizado:**

Para la prospección del estudio sísmico, se utilizó el siguiente equipo:

- Un sismógrafo digital marca GEOMETRICS modelo ES-3000 de 12 canales, digital con recuperación del registro sísmico en un archivo digital.
- Cable de geófonos de 120m., con 12 conexiones para geófonos con separación de 10 m. entre conexiones.



- Geófonos verticales de 12 Hz.
- Herramientas menores.

A continuación se hace una descripción del proceso de ensayo.

### **Preparación de equipo:**

Se desempacan los instrumentos en el siguiente orden: cable de geófonos, cable de martillo, cable de transmisión de datos entre geode y laptop.

Se tienden los geófonos, tendido del cable del martillo, tendido cable de transmisión de datos geode – laptop.

Se conectan los 12 geófonos en el cable y se los clava en el suelo a distancias pre establecidas (por ejemplo 10 m).

Se asegura que la laptop tenga suficiente carga para todo el ensayo.

Se conecta cable de transmisión de datos geode (sismógrafo) – laptop

Se verifica que batería de campo para geode tenga suficiente carga. Esta batería también se puede reemplazar por un generador.

Se conecta al geode cable de geófonos, cable de martillo o cable de disparo, cable de transmisión de datos.

Se verifica parpadeo de 2 luces de geode (tonalidad azul).

Se enciende laptop. Crear una carpeta en C: para almacenar los registros de arribos y darle un nombre

Se verifica que al palpar los geófonos estos reciban señal, tanto como la posición de los geófonos 1 y 12 y su posición correcta en ventana.

Se verifica que se inicie en trabajo en modo refracción.

Se golpea la placa metálica o realizar voladura para emitir señales.

Para la recepción de señales, elección de primeras llegadas y cálculo de dromocronas, tomografía sísmica se utilizan tres programas parte de paquete computacional Seislmager, Pickwin y Plotrefa respectivamente

Módulo Pickwin, presenta los registros de ondas, de acuerdo a la ubicación de los geófonos, con una escala de tiempo, tal que se puede realizar la selección de las primeras llegadas y determinar las dromocronas para cada línea sísmica. Así también se pueden visualizar en un mismo gráfico las dromocronas de ida y vuelta,

Módulo Plotrefa, permite identificar las dromocronas, número de capas del subsuelo y las velocidades de ondas longitudinales correspondientes a la vez que el programa realiza la inversión a través de la tomografía, generando el modelo de capas como resultado final (Peralta, 2007)

Se realizaron 10 líneas de refracción sísmica, mediante las cuales se puede definir una estratigrafía de origen sedimentario con poca variación lateral consistente en: Una capa superior con un predominio de limos arcillosos, arcilla y lentes de arena con un espesores que varían de 0 a 7 m; bajo esta capa superior subyace un estrato de arena con espesares que varían entre 7 m a 25 m más abajo un basamento de roca con espesor mayor a 30 m; los afloramientos de roca arenisca se pueden observar en el cauce del río Huamayacu al oeste del área de estudio, donde el río atraviesa la propiedad de Sr. Tipán.

Los principales objetivos de la sísmica de refracción in situ, son los siguientes:

Determinar las velocidades de las ondas longitudinales de cada capa.

Determinar los espesores de las capas del subsuelo hasta la roca de base, en el caso de que exista, conocida como basamento y establecer una correlación con la geología local.

Calcular la posición de los contactos, con respectivo buzamiento, entre las capas con distintas propiedades físicas, indicadas por las velocidades sísmicas e inclusive el contacto entre la roca de basamento y las capas de subsuelo.

El trabajo de prospección geofísica consistió en la elaboración de 10 (diez) líneas sísmicas de 120 m de longitud cada una que da un total de 1200 metros de líneas de prospección con geofísica de refracción.

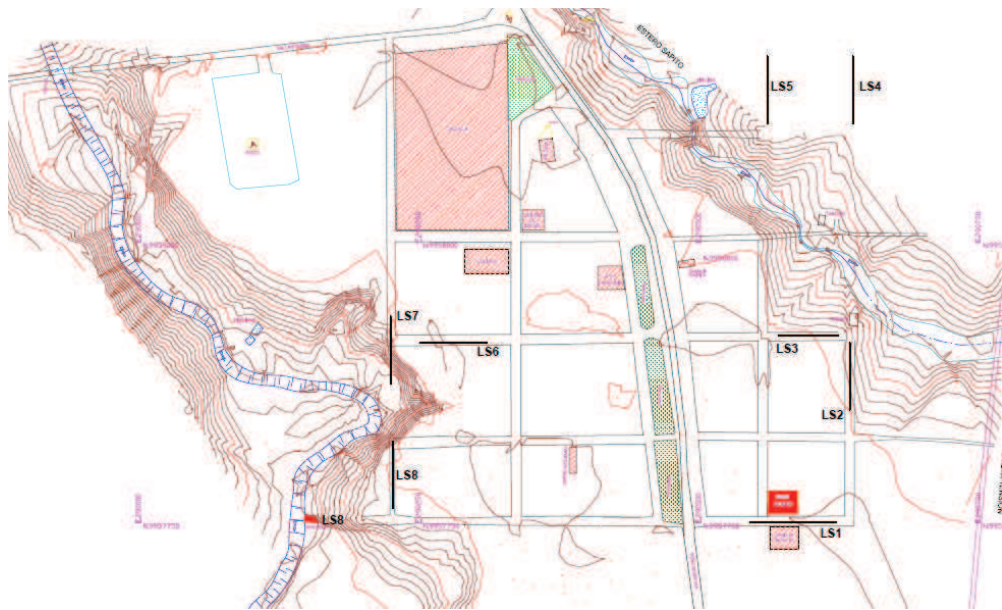
La longitud, calle y sitio de referencia donde fueron levantadas los perfiles sísmicos se indican en la Tabla 2.1 y en el Mapa 2.1 se muestra la ubicación de los mismos en San Carlos.

La ubicación de los perfiles sísmicos se indica en la Tabla 2.1, donde se anotan las calles y sitios de referencia para facilitar su localización, de las líneas sísmicas y los sondeos con perforaciones.

**Tabla 2.1.**

**Localización de los sondeos de refracción.**

Perfil	Longitud (m)	Calle	Sitio referencia
LS1	120	Calle sin nombre	Sur pozo agua Junta Paroquial
LS2	120	Calle 2 y calle B	Frente a bar
LS3	120	Calle B y calle 2	
LS4	120	Area deportiva orientación N-S	Próximo a estero Sapito
LS5	120	Area deportiva orientación E-W	Próximo a estero Sapito
LS6	120	Calle B y calle 3	Sur coliseo
LS7	120	Prolongación calle 4 y calle B	Oeste coliseo
LS8	120	Calle sin nombre	
LS9	120	Sur San carlos	Plantación palmeras
LS10	120	Sur San carlos	Al Sur pozo 45B



**Figura 2.2. Ubicación de líneas de perfiles sísmicos**

Durante la prospección sísmica, se realizaron tres detonaciones en cada perfil sísmico distribuidas de la siguiente manera: dos explosiones a 4m. de distancia de los geófonos 1 y 12, una explosión a 6 m de distancia entre los geófonos 6 y 7 colocados en la superficie.

La cantidad de explosivo utilizado fue suficiente para obtener registros sísmicos claros e interpretables de acuerdo a las condiciones físicas del sitio. Debido a que se realizó la sísmica en área poblada se utilizó la mínima cantidad de explosivo (medio cartucho de explogel).

### **2.1.1.3 Trabajos de gabinete**

Interpretación de los registros de llegada de ondas longitudinales. En el caso ingeniería civil interesa definir parámetros de resistencia al corte para el cálculo de cimentaciones pero en este estudio de suelos contaminados interesa más caracterizar el suelo respecto a su textura.

Esto permitirá modelar de manera más real el flujo de agua o de un sólido disuelto transportado entre la porosidad del suelo. Para la interpretación y la obtención de tomografías del subsuelo bajo cada línea

sísmica se utilizaron los programas pickwin para interpretar registros de llegada y plotrefa con el fin de estimar los perfiles geosísmicos.

#### **2.1.1.4 Alcance en profundidad de los sondeos**

Los ensayos de las líneas sísmicas de refracción permitieron llegar a la profundidad máxima de investigación igual a 51m medida en la Línea Sísmica 9.

#### **2.1.2 Perforaciones realizadas en el subsuelo del área urbana de la Parroquia San Carlos.**

Luego de tener una imagen inicial de la conformación del subsuelo del área urbana de la parroquia San Carlos y más específicamente de las profundidades de cada una de las capas se procedió a realizar perforaciones para recuperar muestras del suelo y muestras de agua para determinar con exactitud los espesores de las capas de suelo y clasificarlos de forma apropiada según un Sistema Unificado de Clasificación (SUCS).

Para realizar el modelamiento del subsuelo lo que interesa, en primera instancia, es determinar con exactitud, por medio de las perforaciones, los espesores de las capas y los tipos de suelos.

Las perforaciones también facilitan la medida, desde la superficie, por medio de una sonda las diferentes profundidades del nivel freático en el subsuelo así como también la medida de la permeabilidad de las capas del subsuelo mediante ensayos de bombeo. Ver Anexo 1 Registro de Sondeos.

##### **2.1.2.1 Objetivo de muestreo.**

Las muestras recuperadas de suelo se usan con la siguiente finalidad:

Clasificación del suelo recuperado según SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

Definición de perfiles estratigráficos, es decir las secciones verticales del suelo que muestran la naturaleza y secuencia de varias capas del subsuelo.

### **2.1.2.2 Investigación de campo**

#### **Topografía del sitio**

La altitud del terreno en el área de estudio y correspondiente al pueblo de San Carlos varía entre los 281 hasta 280 msnm. La morfología del terreno corresponde a una terraza aluvial limitada al Este por el Estero Sapito y al Oeste por el Río Huamayacu.

#### **Geología del sector**

El área en estudio corresponde a la Formación Chambira en la predominan los conglomerados, areniscas y lutitas meteorizadas. Los materiales retrabajados de la formación Chambira han sido transportados hasta ser depositados como aluviales de tamaño fino; arenas, limos arcillosos y arcillas (INEMIN, 1987).

#### **Metodología de las perforaciones**

Los pozos de exploración se perforaron con el equipo de Ensayos de penetración Estándar (SPT) bajo la Norma ASTM D 1586 utilizado en ingeniería civil para exploración del subsuelo con objeto de determinar capacidad portante del suelo en el diseño de las cimentaciones para estructuras. En este estudio se emplea el equipo para perforación con avance por golpeo y toma de muestras en una cuchara partida.

#### **Generalidades:**

La campaña de exploración mediante sondeos consistió en la perforación de los pozos denominados P2D, P5D, P6D, P7D, P8D, P9D, P12D, P18D, P19D, P20D, P21D, P22D, P01, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09, P10, P11, P12. (Ver Figura 2.3)

Las cotas de las bocas de los pozos hacen referencia a la cota 0.00 metros, correspondiente al nivel del terreno al momento de la exploración en

cada pozo. Cada boca de pozo tiene una posición en altura (msnm metros sobre el nivel del mar) sobre el nivel del mar que se determina por la georeferencias de la topografía.

En los logs de perforación se reportan: columna estratigráfica, y valores de granulometría humedad del suelo, índices de plasticidad y clasificación del suelo, Para realizar estos ensayos en laboratorio se siguieron las siguientes normas:



**Figura 2.3. Ubicación de sondeos**

### **2.1.2.3 Ensayos de clasificación**

Los ensayos realizados y las normas seguidas se anotan en la Tabla 2.1.

Las muestras recuperadas en los diferentes sondeos fueron clasificadas únicamente mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos para propósitos de ingeniería. Las propiedades que se determinan son los tamaños de las partículas de los suelos y límite líquido e índice de plasticidad, necesarios para clasificar la muestra de suelo según SUCS.

**Tabla 2.1.****Normas utilizadas, ensayos de suelos**

Ensayo	Norma
Humedad	ASTM D 2216-98
Granulometría	ASTM D422-63
Límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad	ASTM D4318-00
Clasificación	ASTM D 2487-00
Gravedad específica	ASTM C127

**2.1.2.4 Exploración**

Los pozos de exploración se perforaron utilizando equipo de penetración estándar SPT recomendado para este propósito con la colocación de revestimiento de tubos PVC para evitar el desmoronamiento de las paredes laterales. La localización de los pozos se muestra Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.****Pozos, coordenadas UTM de localización, cotas en la boca**

POO	ESTE	NORTE	BOCA POZO (msnm)
P 2 D	290040.19	9958128.83	270.50
P 5 D	290638.32	9957930.23	267.10
P 6 D	290492.90	9957920.86	270.50
P 7 D	290510.61	9958008.50	269.50
P 8 D	290497.47	9957861.84	270.60
P 9 D	290616.81	9957849.82	270.30
P 12 D	290556.58	9958011.08	268.50
P 18 D	290307.71	9958175.18	270.50
P 19 D	290248.22	9958053.36	270.40
P 20 D	290201.49	9958100.99	270.60
P 21 D	290116.57	9957943.42	262.50
P 22 D	290154.92	9957931.69	263.10
P 01	289974.63	9958163.01	263.50
P 03	290104.06	9958056.18	270.50
P 04	290273.93	9957913.89	271.50
P 05	290623.31	9957919.16	269.20
P 06	290433.29	9957901.92	270.50
P 07	290151.65	9958115.52	270.50
P 08	290543.25	9957846.88	270.50
P 09	290623.32	9957826.71	270.30
P 10	290573.93	9957737.22	270.80
P 11	290345.89	9957990.53	270.50
P 12	290558.48	9957997.74	267.90



#### **2.1.2.5 Proceso para recuperación de muestras para ensayos físicos**

La Perforación se realizó a percusión utilizando el equipo de SPT (Ensayo Penetración Estándar) mecánico, el avance de la perforación se condujo a golpe con martillo de 140 lbs de peso.

Las muestras se recuperaron dentro del toma muestras bipartido en maniobras no mayor de 0.50 m.

La muestra se almacenó dentro de una caja de madera y se realizó la identificación de la misma.

En la muestra obtenida se realizó una previa descripción de campo, de su contenido de humedad, plasticidad, compacidad o consistencia. Se identificó el color y olor de las muestras y la presencia de material orgánico o bituminoso extraño al estrato.

Para la realización de otros ensayos se amplió el diámetro del pozo de 4 a 6 pulg.

Se tomaron todas las seguridades para no contaminar las muestras extraídas.

Se utilizó tubería de revestimiento para evitar el derrumbe del pozo.

Para profundidades mayores de 10m utiliza perforador helicoidal

#### **2.1.2.6 Recopilación y transporte de muestras**

Las muestras de suelo que se destinaron para clasificación según SUCS, se recogieron en primera instancia en recipientes (fundas de forma alargada) plásticos y colocados en cajas de madera. Las cajas de madera tuvieron las siguientes características:

Medidas: largo = 1 m, ancho 58 cm, altura 8 a 10 cm.

En la caja constaran los siguientes datos.

Sondeo, se anota número e identificación del sondeo:

Caja, se anota el número de caja y el total de las mismas en un sondeo:

Profundidad de los muestreos: desde \_\_\_\_ hasta \_\_\_\_.

### **2.1.3 Colección de muestras para ensayos ambientales**

#### **2.1.3.1 Objetivos**

Perforar pozos de monitoreo y coleccionar muestras de suelo a diferentes profundidades y transportarlas en cadena de seguridad al laboratorio.

Colectar muestras de suelo para ensayos en laboratorio.

La perforación de los pozos se realiza empleando la metodología descrita anteriormente.

Para recolectar la muestra de suelo, el saca muestras se abre cuidadosamente y se toman 0.75 kg de muestra para análisis químico (método ASTM D420-98).

#### **2.1.3.2 Toma de muestras**

Antes de comenzar el muestreo, los técnicos deben lavarse las manos con jabón y enjuagarse suficientemente.

Para el muestreo siempre usar guantes.

La profundidad a la cual se toma la muestra en los pozos varía entre 4m a 6m dentro del acuífero superior.

Las herramientas de muestreo (saca muestras, tubo partido de acero inoxidable) deben ser bien lavados antes y después de la recolección de muestras con abundante agua destilada y un cepillo fuerte.

Para análisis específico de metales se colectaron 250g a 500 g de suelo en fundas ziplock.

### **Transporte y preservación de muestras**

Las muestras de suelos fueron preservadas a oscuras en enfriadores procurando mantener la temperatura entre 4-5 °C. Antes de transportar las muestras a los laboratorios CEINCI de la ESPE y laboratorios de PETROECUADOR se llenó y observó una cadena de custodia. Una copia de la cadena de custodia se acompañó a cada lote que se envió al laboratorio

#### **2.1.4 Pruebas de bombeo**

El ensayo de bombeo es el método más fiable para el cálculo de los parámetros hidrogeológicos de un acuífero. Consiste en bombeo de un pozo, en principio a caudal constante, y analizar el descenso de los niveles piezométricos, tanto en el pozo de bombeo como en pozo o piezómetros circundantes.

Debido a que el caudal de recuperación de los pozos perforados en su mayoría fue muy bajo, se optó por aprovechar la existencia de pozos artesanales (PA) para efectuar los ensayos de bombeo. En la Tabla 2.3 se identifican los pozos y su ubicación.

**Tabla 2.3.**

**Ubicación sitios ensayos de bombeo. PA = pozo artesanal**

	<b>Ubicación</b>	
Pozos someros < 10 m	PA01	18290516E, 9967957N
	PA02	18290445E, 9957797N
	PA03	18290444E ,9957820N
	PA04A	18290384E, 9958008N
	PA04B	18290384E, 9958008N
	PA04C	18290384E, 9958008N
Pozos someros > 10 m	PA07	18290609E, 9957784E
	PA08	18290375E, 9957930N
	PA09	18290415E, 9958186N

### 2.1.4.1 Parámetros Hidrogeológicos

#### Permeabilidad

Para evaluar la capacidad de almacenar y transmitir el agua por parte de un acuífero se deben asociar a las formaciones geológicas, cuatro parámetros básicos: Porosidad y coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad (González de Vallejo, 2006).

Las expresiones para el cálculo de permeabilidades son (Bedient, Rifai, & Newell, 1999):

Para acuífero libre:

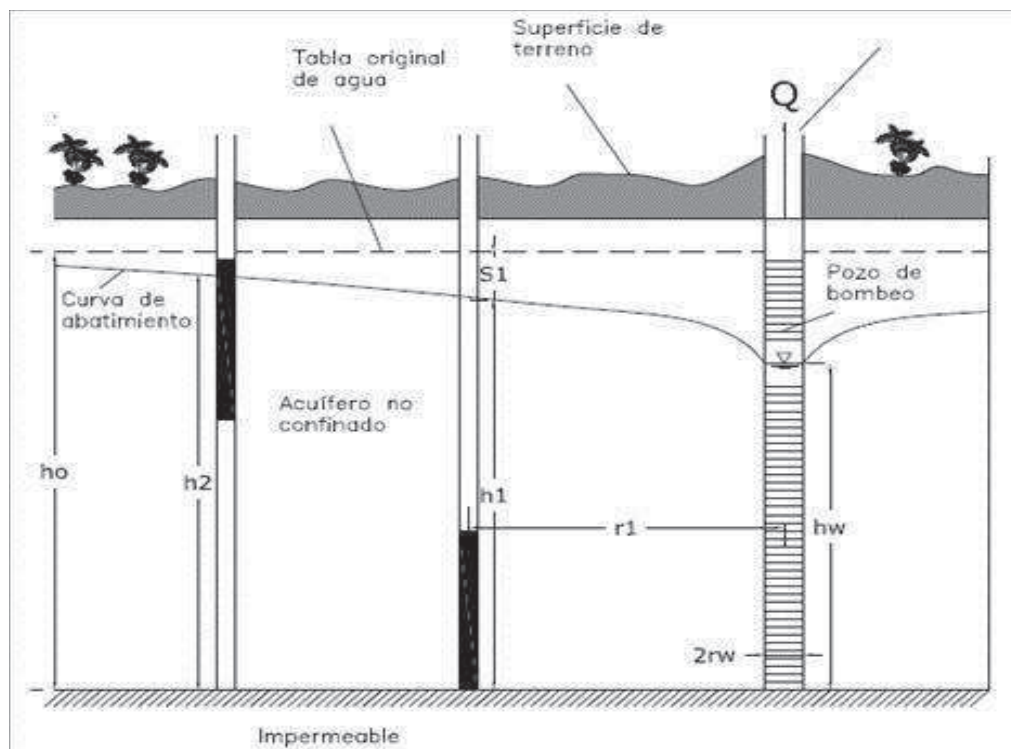
$$K = \frac{Q}{\pi(h_1^2 - h_w^2)} \ln \frac{r_1}{r_w} \quad (1)$$

Donde, K es la permeabilidad, Q es el caudal,  $h_w$  representa la carga de agua en el pozo,  $h_1$  la carga de agua en el punto 1,  $r_w$  es el radio del pozo y  $r_1$  el radio de influencia

Para acuífero confinado:

$$K = \frac{Q}{2\pi b(s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

Donde b es el espesor del acuífero,  $s_1$  expresa el abatimiento en el punto 1,  $s_2$  expresa el abatimiento en el punto 2,  $r_1$  es la distancia radial al punto 1 y  $r_2$  la distancia radial al punto 2.



**Figura 2.4: Esquema de acuífero no confinado. Fuente Bedient, 1999**

### 2.1.5 Medida de caudales (aforos) con molinete en río Huamayacu y estero Sapito

La medida de los caudales o aforos en los diferentes sitios correspondientes al río Huamayacu y al estero Sapito se realizó utilizando un micromolinete, que mide las velocidades de flujo y también permite elaborar un perfil del cauce del río para estimar el área de la sección transversal.

Se eligieron tres sitios en el río Huamayacu y tres sitios en el estero Sapito, de tal forma que coincidan con las locaciones extremas al inicio y al final de la frontera del área de estudio y un sitio intermedio.

El principio de la medida de aforos con molinete es el siguiente (Zona de ingeniería apuntes, 2012) .- Para un movimiento uniforme, el espacio  $S$  recorrido por una hélice o por una partícula de agua a través de ésta, se representa por el número de rotaciones,  $N$ , que da el molinete en  $T$  segundos. Ver Anexo 2, Medida de Caudales

$$\text{Luego } V = N / T \quad (3)$$

Como existen fricciones en las partes mecánicas del aparato, es necesario introducir un coeficiente de corrección, b.

$$\text{Entonces } V = b * N / t \quad (4)$$

Y haciendo  $n = N / t$ , la frecuencia de giro, se tiene:  $V = b*n$

Con el molinete calibrado a partir de una velocidad mínima, a que en general, es del orden de 1 cm/s, por debajo del cual el aparato no se mueve, la ecuación del aparato se transforma en  $V = a + b*n$  que es propia para cada molinete o según el fabricante.

## 2.2 TRABAJOS DE LABORATORIO DE SUELOS

El programa de estudios de laboratorio tuvo como objetivo la clasificación de los suelos recuperados a las diferentes profundidades y a su descripción visual. Los resultados de estos ensayos se presentan tabulados en los registros de campo y forma parte del Apéndice Ensayos de Laboratorio.

### 2.2.1 Ensayos de clasificación

Los ensayos de laboratorio realizados en las muestras de suelo y las normas seguidas se anotan en la siguiente Tabla 2.4.

**Tabla 2.4.**

#### **Normas ensayos laboratorio de suelos.**

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>
Humedad	ASTM D2216-98
Granulometría	ASTM D422-63
Límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad	ASTM D4318-00
Clasificación	ASTM D2487-00

Se debe anotar que las muestras recuperadas en los diferentes sondeos fueron clasificadas únicamente mediante el Sistema Unificado de

Clasificación de Suelos. En el laboratorio se determinó: granulometrías, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

### 2.2.2 Relaciones volumétricas

En mecánica de suelos se considera a un elemento de suelo conformado por tres fases cada una de las cuales posee un peso y un volumen propios. Las fases son: el aire, el agua y los sólidos. El volumen ocupado por las tres fases se considera un volumen total  $V_T$ , el volumen ocupado por agua más el aire se denomina volumen de vacíos  $V_v$ .

Al tomar en cuenta la porosidad  $\eta$  se consideran todos los espacios vacíos existentes entre los granos de suelo, pero para el caso de un modelo de flujo intergranular del agua, se toma en cuenta el volumen de los espacios vacíos interconectados entre sí, de manera que hace falta definir otra forma de porosidad, aquella denominada porosidad efectiva .

$$\eta = \frac{V_v \text{ interconectados}}{V_T} \quad (5)$$

La relación entre el peso de la parte sólida  $W_s$  y su volumen  $V_s$  es el peso específico de las partículas  $G$ . Esta se expresa como adimensional al ser dividido por el valor del peso específico del agua  $\gamma_w$  a 4 °C.

$$G = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (6)$$

### 2.2.3 Ensayos Gravedad Específica, porosidad total

Se realizaron ensayos para calcular gravedad específica en varias muestras de suelo tomando en cuenta el siguiente criterio:

Se toman dos muestras por pozo una de la capa limosa arcillosa y otra de la arena fina de más profundidad. Las humedades y pesos específicos se toman de los respectivos ensayos.

Para el cálculo de la porosidad se ha considerado el suelo saturado y se ha calculado según la fórmula:

$$\theta = \frac{w * G}{1 + w * G} \quad (7)$$

Donde  $\theta$  = porosidad; w = % de humedad; G = gravedad específica

## **2.3 ENSAYOS QUÍMICOS**

Los métodos utilizados en este trabajo para analizar los metales pesados, son aquellos que emplean la técnica de espectrometría de absorción atómica.

Esta técnica es capaz de detectar y determinar cuantitativamente los metales de la tabla periódica. Este método consiste en la medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular. La especie atómica se obtiene por atomización de la muestra, utilizando diferentes técnicas (llama u horno de grafito), Estas nebulizan la muestra y luego la diseminan en forma de aerosol dentro de una llama de aire - acetileno u óxido nítrico – acetileno. Ver Anexo 3, Ensayos Químicos.

### **2.3.1 Preparación de muestras**

Las muestras de suelos colectadas en campo fueron sometidas a un proceso de secado, 110°C en una mufla, a continuación las muestras fueron trituradas en un mortero y se pasó por un tamiz número 200, finalmente se pesó 2g de cada muestra para los ensayos de digestión.

### **2.3.2 Digestión de muestras**

La digestión de muestras de suelo y sedimento se realizó siguiendo el método EPA 3050. Se preparó una solución 2N de ácido nítrico y ácido clorhídrico (HNO<sub>3</sub>/HCl).

De acuerdo al número de muestras se preparó 1L de HNO<sub>3</sub> - 2N y 1L de HCl - 2N. Dos gramos de muestra fueron colocadas en recipientes plásticos, en los cuales se añadió 35,5 mL de HNO<sub>3</sub> y 12,5 mL de HCl, alcanzando un volumen final de 50 ml, los recipientes fueron tapados, etiquetados de



acuerdo al origen de la muestra y finalmente agotados en un agitador mecánico a 50 rpm durante 2 días.

Transcurrido el tiempo, las muestras digestadas se colocaron en tubos falcom para su centrifugación a 150 rpm durante 20 minutos. El sobrenadante se colectó en recipientes plásticos y el precipitado (suelo) se sometió a una segunda digestión siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

### **2.3.3 Medición de metales por Absorción Atómica**

#### **2.3.3.1 Método de absorción atómica.**

Para medir las concentraciones de los metales, níquel, plomo, cadmio y vanadio se utilizó el Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer 800 con la tecnología de flama y lámparas de cátodo hueco, con mezclas de gases aire – acetileno y acetileno - óxido nitroso (para el caso del vanadio). Se utilizaron los métodos descritos en el Standard Methods for water and wastewater examination (Greenberg, Clesceri, & Eaton, 1992)

Preparación de la muestra.- Las muestras de suelo recuperadas en el campo fueron sometidas a un proceso de secado a 110 °C en una mufla, las muestras ya secas fueron trituradas en un mortero y pasadas por un tamiz No. 200 (abertura 0.075 mm). Finalmente se pesó 2 g de muestra.

Preparación de la solución por digestión.- Según método EPA 3050 para la digestión de muestras de suelo y sedimento se preparó soluciones 2 N de los ácidos  $\text{HNO}_3$  /  $\text{HCl}$  en relación 2:1. De acuerdo al número de muestras se preparó 1 L de  $\text{HNO}_3$  2N y 1 L de  $\text{HCl}$  2 N. Las muestras pesadas fueron colocadas en recipientes plásticos y en estos se añadió 35.5 ml de  $\text{HNO}_3$  y 12.5 ml de  $\text{HCl}$ , se tapó los recipientes con tapa y contratapa, se etiquetó de acuerdo, se etiquetó de acuerdo a la muestra y finalmente se llevó a agitación en un agitador mecánico a 50 rpm durante 2 días. Transcurrido el tiempo, las muestras digestadas se colocaron en tubos falcom para su centrifugación a 150 rpm durante 20 min, el sobrenadante se colectó en

recipientes plásticos y el precipitado (suelo) se sometió a una segunda digestión siguiendo el mismo procedimiento anterior.

Medición de metales por absorción atómica.- Para medir los metales níquel, cadmio, plomo y vanadio se utilizó un espectrógrafo de absorción atómica Perkin Elmer 800, con llama aire acetileno como gas transportador y acetileno – óxido nitroso para el caso del vanadio Conel estándar comercial de 1000 mg/L de cada elemento se preparó cuatro soluciones estándar para realizarla curva de calibración de cada metal. Se utilizó las siguientes normativas de la Tabla 2.5

**Tabla 2.5.**

**Normas ensayo, método de adsorción atómica**

<b>Metal</b>	<b>Método de espectrómetro de adsorción atómica AA</b>
Níquel	3500 Ni B AA Method
Cadmio	3500 Cd B AA Method
Plomo	3500 Pb B AA Method
Vanadio	3500 V B AA Method

**2.3.4 Medición de óxidos por difracción de rayos X.**

**2.3.4.1 Ensayo difracción Rayos X**

Objetivo.- Determinación de su composición en óxidos de hierro, óxidos de aluminio y óxidos de manganeso en muestras de suelo.

Equipo utilizado.- Microsonda de energía dispersiva de rayos X, microscopio electrónico de barrido, cemento plástico conductor de carbón, software EDAX GENESIS, software Xt microscope server

Procedimiento.-

Se secaron 4 muestras y se escogieron fragmentos de aproximadamente 1 cm<sup>3</sup>.

Cada uno de los fragmentos se ponen en un portamuestras, adheridos con cemento plástico conductor de carbón.

Se introducen los portamuestras en el interior de la cámara de especímenes del microscopio de energía dispersa de rayos X, para ser analizadas cada una de las muestras en bajo vacío debido a que estas no tenían recubrimiento metálico y no eran conductoras.

Para observar las muestras se ejecuta el programa MEB y para determinar el porcentaje de óxidos en las muestras se realiza una recolección total de espectros con ayuda del programa EDAX que a la vez cuantifica los óxidos presentes.

## CAPITULO III

### RESULTADOS

#### 3.1 RESULTADOS ENSAYOS DE CAMPO.

##### 3.1.1 Resultados sondeos geofísica

Para la interpretación de las líneas sísmicas se utilizó un paquete de programas SeisImager que pertenece a la misma casa fabricante del sismógrafo modelo ES3000. El paquete “Seisimager” está conformado entre otros por los programas Pickwin (Pick First Breaks or Dispersión Curves), Plotefra (Refraction Analysis) que en resumen realizan los siguientes trabajos:

Los gráficos siguientes representan los perfiles geosísmicos de las 10 líneas sísmicas, en los que se puede ver la variación de las velocidades de acuerdo al tipo de capa sondeada.

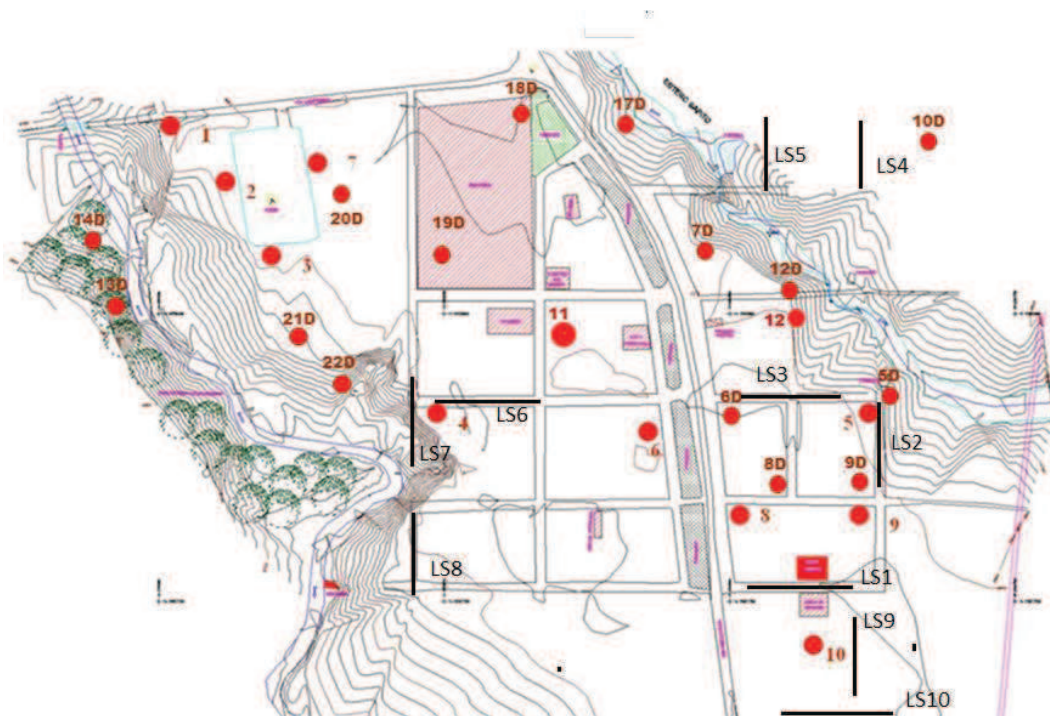


Figura 3.1: Croquis ubicación de los perfiles sísmicos.

### Perfil sísmico LS-1

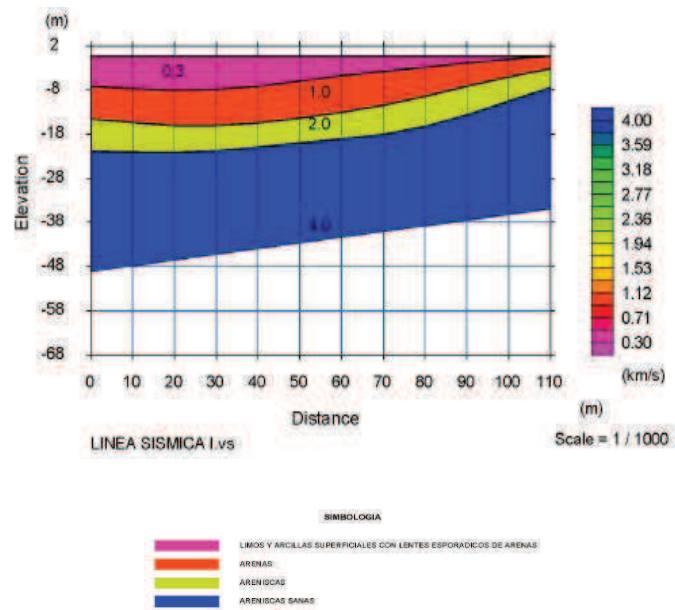


Figura 3.2: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-1

### Perfil sísmico LS-2

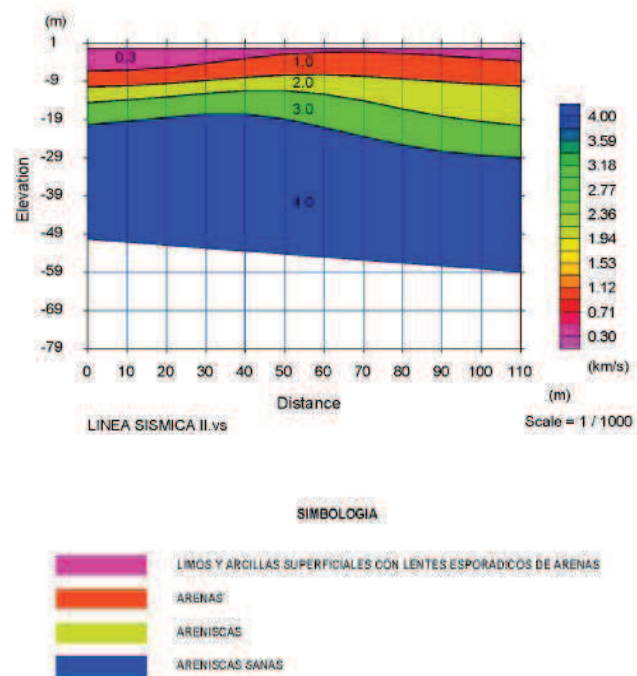


Figura 3.3: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-2

### Línea sísmica LS-3

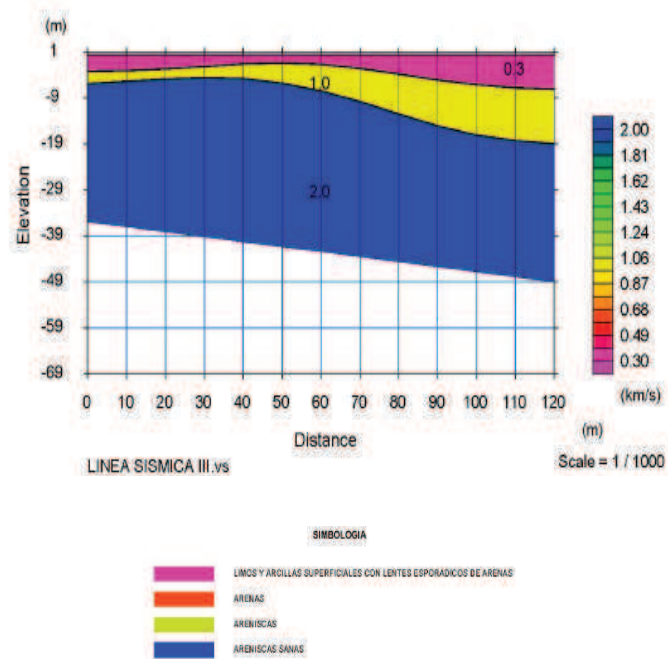


Figura 3.4: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-3

### Perfil sísmico LS-4

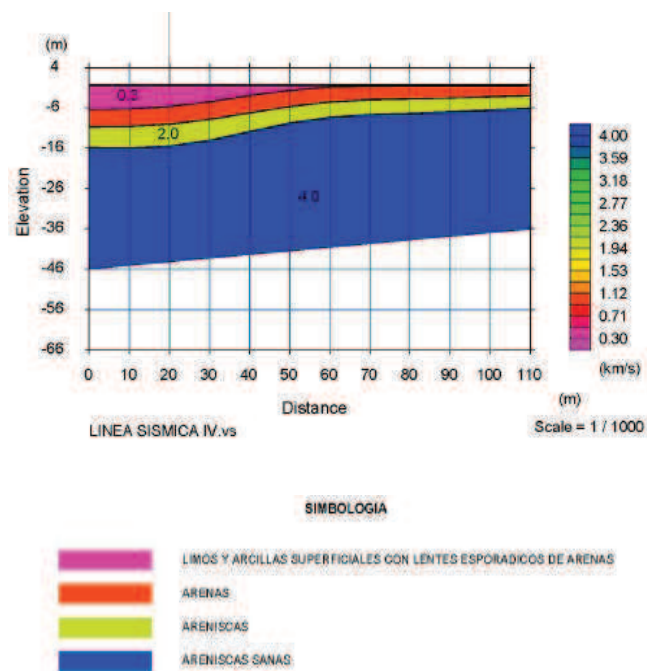


Figura 3.5: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-4

### Línea sísmica LS-5

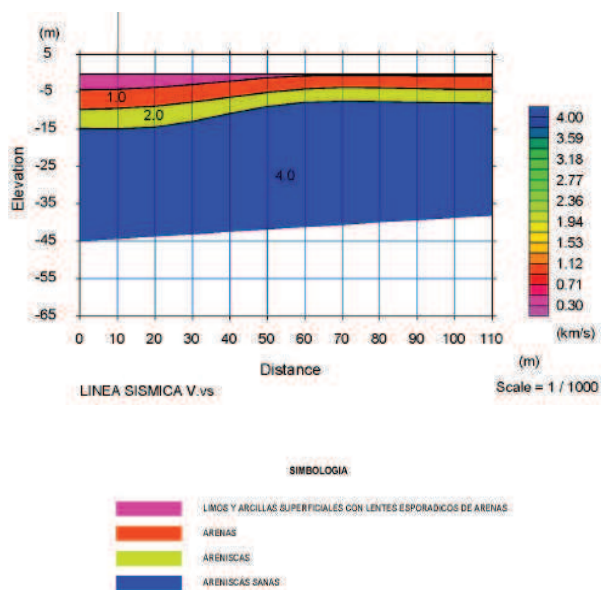


Figura 3.6: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-5

### Línea sísmica LS-6

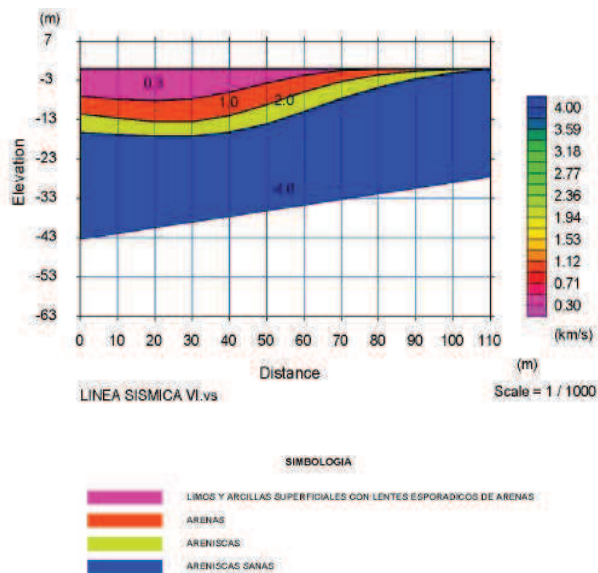


Figura 3.7: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-6

### Línea sísmica LS-7

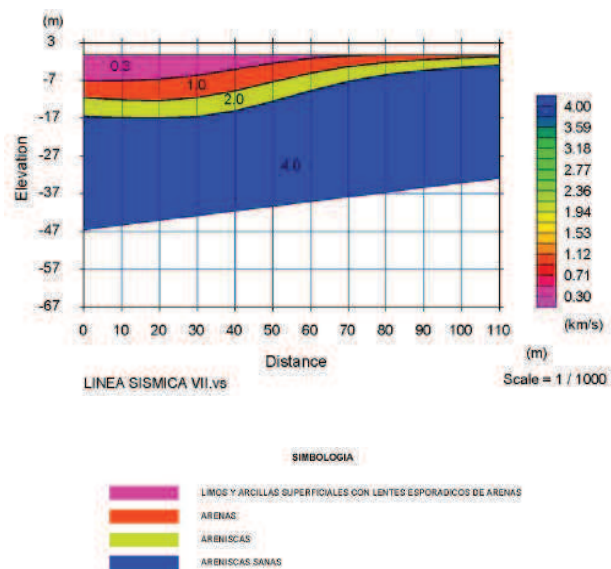


Figura 3.8: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-7

### Línea sísmica LS-8

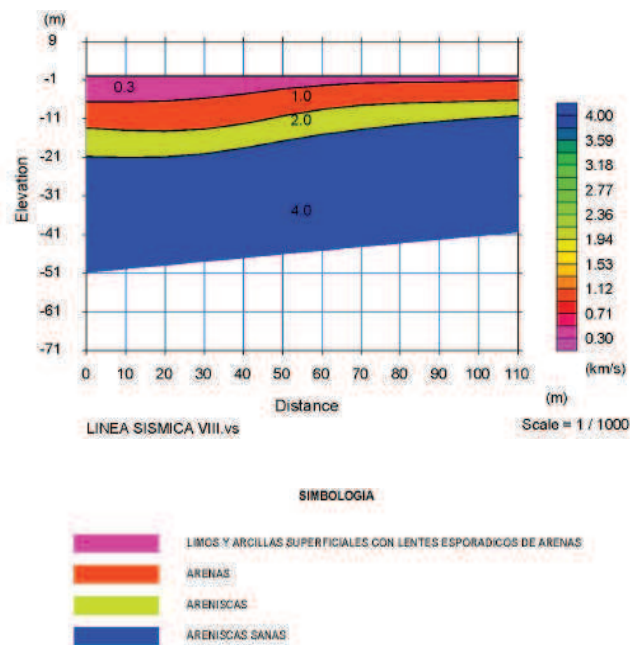


Figura 3.9: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-8



### Línea sísmica LS-9

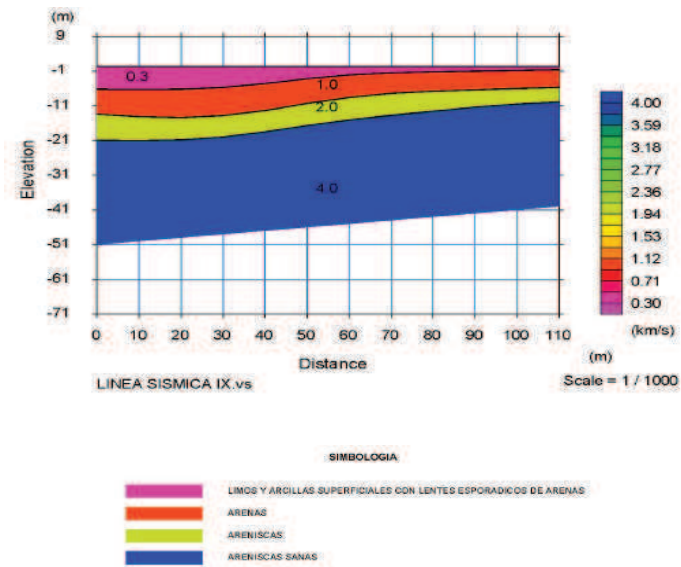


Figura 3.10: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-9

### Línea sísmica LS-10

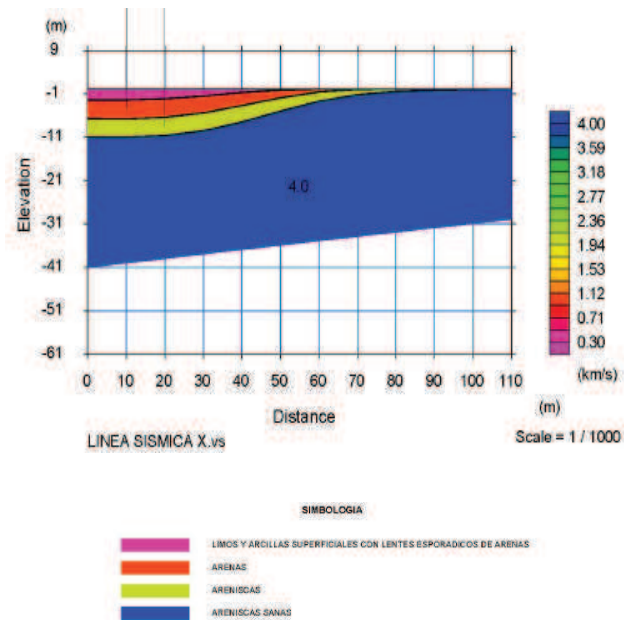


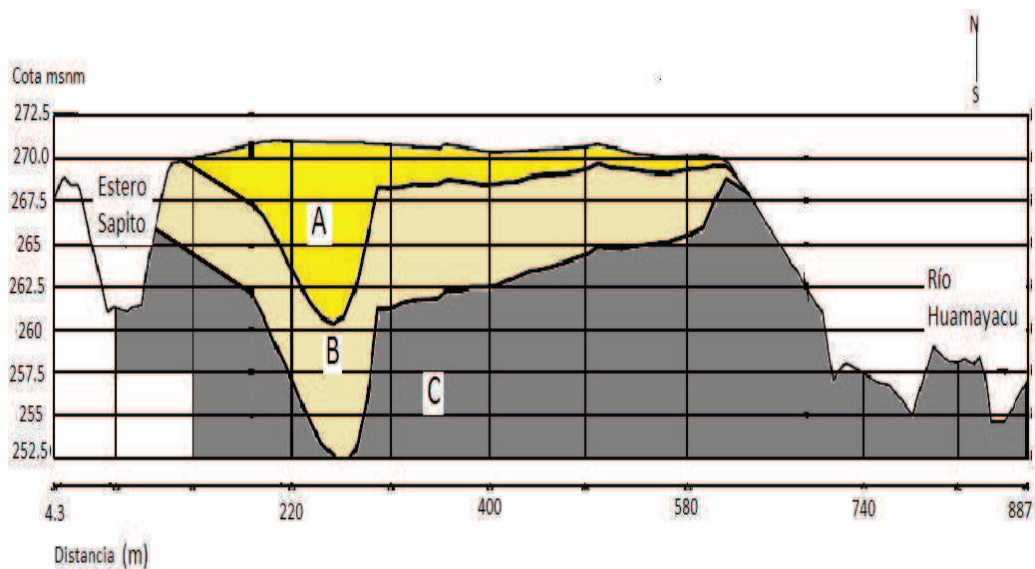
Figura 3.11: Perfil geosísmico, línea sísmica LS-10

### 3.1.1.1 Perfiles geosísmicos solapados

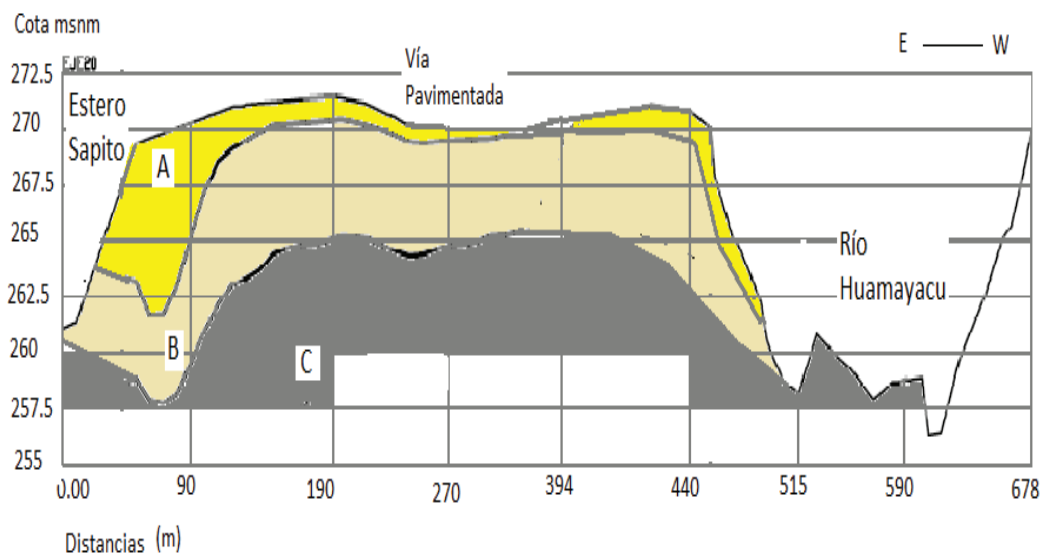
Modelos estratigráficos solapados se denominan a los interpretados por la acción conjunta de dos o más registros de líneas sísmicas.

Con las tomografías sísmicas de dos líneas sísmicas consecutivas se elaboran perfiles solapados con el objetivo de tener una idea global de la estratigrafía en el subsuelo del área urbana de la Parroquia San Carlos.

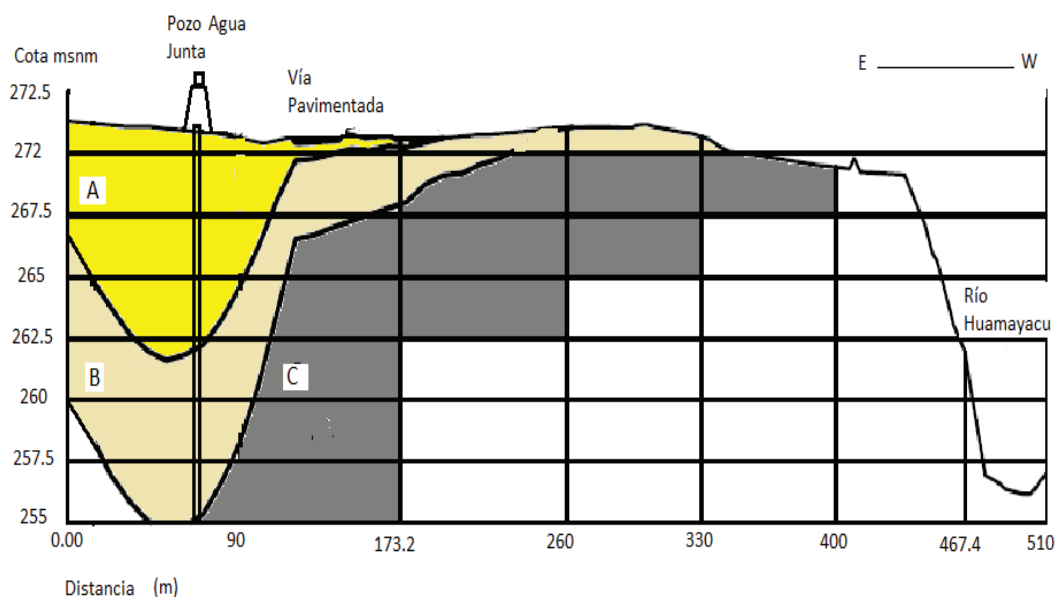
En los perfiles solapados se aprecia el predominio de tres capas en el subsuelo, cada capa con características propias. Cada capa tiene una variación de velocidades de ondas longitudinales determinada por la geofísica de refracción con una correspondencia geológica. Los valores iniciales aproximados de los espesores las tres capas de suelo son: Capa A de 0.0 m hasta 7 m, Capa B de 7 m a 25 m, Capa C mayor a 30 m.



**Figura 3.12: Perfil estratigráfico solapado según líneas sísmicas LS-3 y LS-9. Esc. H: 1:1000, V: 1:100. Simbologías: A) Limos y arcillas superficiales con lentes esporádicos de arena fina B) Arenas finas C) Arenisca meteorizada.**



**Figura 3.13: Perfil estratigráfico solapado según líneas sísmicas LS-2 y LS-6. Esc. H: 1:1000, V: 1:100. Simbología: A) Limos y arcillas superficiales con lentes esporádicos de arena fina B) Arenas finas C) Arenisca meteorizada**



**Figura 3.14: Perfil estratigráfico solapado según líneas sísmicas LS-1 y LS-8. Esc. H: 1:1000, V: 1:100. Simbología: A) Limos y arcillas superficiales con lentes esporádicos de arena fina B) Arenas finas C) Arenisca meteorizada**

### 3.1.1.2 Correspondencia geológica

Los parámetros de sísmica de refracción interpretados son finalmente correlacionados con los datos de la geología conocida u observada en el sitio.

Para cada velocidad o rango de velocidades interpretado se establece una correspondencia con los materiales o estados de materiales de acuerdo a la experiencia del autor y al conocimiento de la geología local.

En la Tabla 3.1 se observa la correspondencia entre la geofísica y la geología local, interpretación que siempre podrá ser modificada más adelante de acuerdo a la mayor información geológica disponible y a la exploración directa mediante perforaciones. La interpretación general se ha realizado de acuerdo a la generación del modelo de capas. Los tres perfiles muestran una distribución estratigráfica será utilizada en el modelo de flujo de agua subterránea y flujo de metales pesados Ni, Cd, Pb y V.

**Tabla 3.1.**  
**Correspondencia geológica.**

<b>Complejo sísmico</b>	<b>Variación espesor (m)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Correspondencia Geológica</b>
A	0 a 7 m	300	Suelo superficial limos arenosos
B	7 a 25 m	1000-2000	Arena
C	Mayor a 30 m	2000-4000	Roca Arenisca

### 3.1.2 Resultados de las perforaciones.

Descripción de la estratigrafía en cada sondeo:

Sondeo P1.- Capas de diferentes espesores de arcillas de alta compresibilidad CH, intercaladas por capas de limos de baja compresibilidad ML, limos de alta compresibilidad y arenas (de grano fino) limosas SM.

Sondeo P2.- Predominan las arenas (de grano fino) limosas con espesor de hasta 4.5 m.

Sondeo P3.- Arenas abajo de los 5 m de profundidad, arcillas hasta los 2 m y limos de 3.4 m a 4.9 m.

Sondeo P4.- Sucesión de limos y arcillas sobre una capa de arena a una profundidad de 5.65 m.

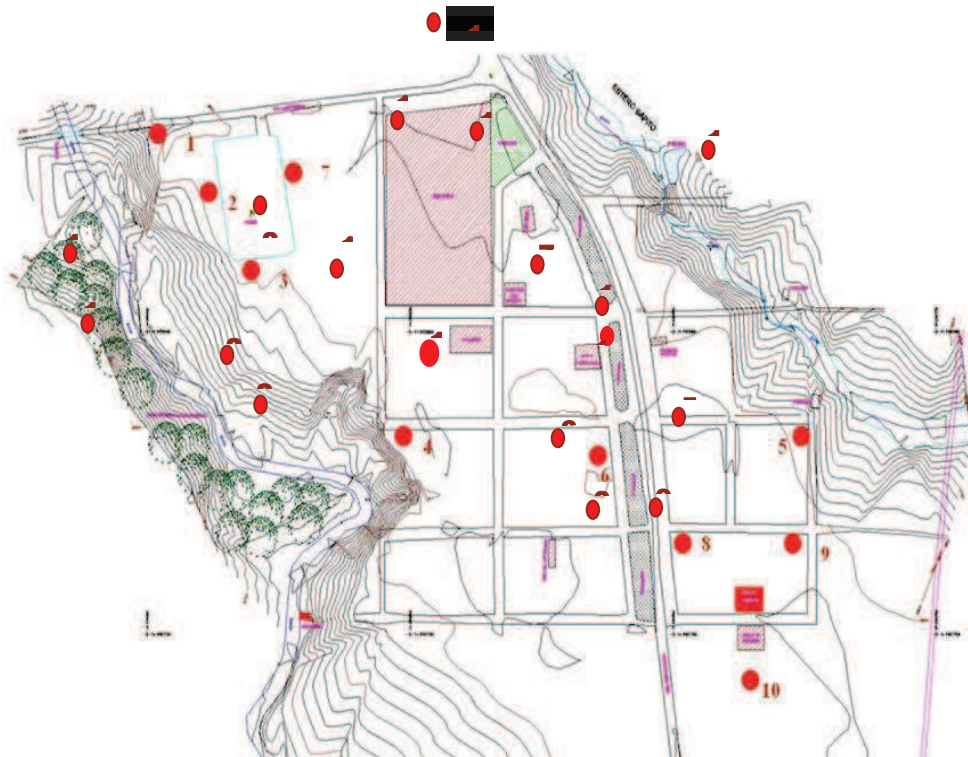
Sondeo P5.- Un predominio de limos de alta compresibilidad hasta los 6.4 m de profundidad subyacen capas de arenas limosas y limos.

Sondeo P6.- Semejante al anterior hasta los 5.5 m de profundidad limos de alta compresibilidad, subyacen intercalaciones de arcillas, limos y arenas.

Sondeo P7.- Capas intercaladas de arcillas limos y arenas arcillosas hacia el fondo.

Sondeo P8.- Capas intercaladas de limos, arcillas y arenas hacia el fondo.

Sondeo P9.- Limos hasta los 4.9 m de profundidad, subyacen arenas limosa o arcillosas.



**Figura 3.15: Ubicación de sondeos de exploración**

Sondeo P10.- Limos hasta los 4.9 m de profundidad, subyacen arcillas y limos y arenas hacia el fondo.

Sondeo P11.- Limos de alta compresibilidad hasta una profanidad de 4.25 m, subyacen arenas limosas con una capa de limo hacia el fondo.

Sondeo P12.- Limos de alta compresibilidad hasta los 4.25 m de profundidad, subyacen una intercalación de limos y arcillas y hacia el fondo arenas limosas.

Sondeo P2D.- Arcilla saturada muy plástica de alta compresibilidad hasta 1 m de profundidad, arcillas limosas muy plásticas de 1 m hasta 2 m, arenas limosas desde los 2 m hasta los 2.8 m, desde los 2.8 m hasta 4 m arcilla de alta compresibilidad muy plástica, de 4 m hasta 5 m arenas limosas, de 5 m a 6.25 m limo de alta compresibilidad saturado muy plástico. Desde los 6.25 m hacia abajo arenas limosas hasta los 20 m.-

Sondeo P5D.- Arcilla de alta compresibilidad de 0 m hasta 0.75 m, desde este nivel hasta los 8.5 m de una sucesión de capas de limos con una capa de arcilla intermedia. Desde 8.5 m de profundidad hasta los 20 m arenas limosas de grano fino color negro.

Sondeo P7D.- Hasta los 4.75 m de profundidad limos de alta compresibilidad saturados, desde los 4.75 m hasta los 12.5 m arenas limosas de grano fino color negro. Una capa de limo arcilloso desde 12.5 m hasta 13.25 m, desde esta profundidad hasta los 18.75 m arenas finas color negro con una capa de limo de alta compresibilidad de 15.5 m a 17 m de profundidad.

Sondeo P9D.- Limos de alta compresibilidad hasta los 6.25 m con una capa de arcilla de 2.5 m a 2.75 m. Desde los 6.25 m de profundidad hasta los 18.25 m arenas limosas grano fino color negro con una capa de limo de 0.25 m desde los 12.0 hasta los 12.25 m.

Sondeo P12D.- Arcillas de alta compresibilidad saturada hasta 1 m de profundidad, desde 1 m de profundidad hasta los 4 m arenas limosas, grano fino color negro, desde los 4 m hasta los 7.75 m limos saturados de alta compresibilidad. Desde los 7.75 m de hasta los 20 m arenas limosas grano fino color negro. De 14 m a 15 m de profundidad limos de baja compresibilidad.

Sondeo 18D.- Una sucesión capas de limos y arenas limosas hasta los 9.25 m de profundidad, con una capa de arcilla de 8.75 a 9.25 m de profundidad. Desde los 9.25 m de profundidad hasta los 15 m arenas arcillosas de grano fino color negro.

Sondeo P19D.- Limos de alta compresibilidad hasta los 5.25 m de profundidad, Subyace hasta los 15 m de profundidad arena limosa fina color negro.

Sondeo P20D.- Capas de limos de alta o baja compresibilidad y arenas hasta los 7.75 m de profundidad, desde esta profundidad subyace arena grano fino limosa color café amarillento.

Sondeo P21.- Hasta los 6.75 m limos de alta compresibilidad, subyace una capa de arena gris oscura de grano fino, no plástica, saturada.

Sondeo P22D.- Capas de limos de baja o alta compresibilidad y arenas hasta los 10 m de profundidad, desde esta profundidad subyace un arena arcillosa de grano fino color negro.

### **3.1.3 Resultados generales de los sondeos**

#### **3.1.3.1 *Respecto a los tipos de suelo***

En todos los pozos hacia la superficie, los suelos recuperados han sido clasificados en su mayoría como limos (MH, ML), con mayores espesores, arcillas en menor cantidad (CH, CL), con menores espesores y hacia mayores profundidades se encuentran arenas limosas (SM) con esporádicas capas de limos.

Hay un predominio de limos de alta compresibilidad MH a profundidades menores a 10 m, luego subyacen capas de arenas de grano fino limosas de baja plasticidad. Esta sería una tendencia aproximada de toda la estratigrafía del subsuelo en San Carlos hasta los 15 m de profundidad o mayores.

Hasta las profundidades menores a 10 m, existe un predominio de arenas finas, limos arcillosos y con capas de arcillas hacia la superficie. La variación lateral es muy poca, lo que cambian son los espesores de los suelos mencionados

Los porcentajes de humedad alcanzan hasta el 110% en pozo P21D (de 6.5 a 7m), existiendo una tendencia en la mayoría de los pozos a una disminución de la humedad con la profundidad.



Los límites líquidos varían desde 61 hasta 102% y en suelos finos aumenta la permeabilidad y la compresibilidad con el aumento de límite líquido

La plasticidad de los suelos disminuye con la profundidad, eso indica que los depósitos aluviales de suelos con índices de plasticidad altos son superficiales y hay una tendencia al apareamiento de arenas al aumentar la profundidad.

### **3.1.3.2 Respecto al perfil estratigráfico**

Para el análisis de las columnas estratigráficas se ha tomado los perfiles de los registros de sondeo P20D, P19D, P6D y P9D por haberse ejecutado en las áreas Este y Oeste de San Carlos (ver Anexo 3, Perfil estratigráfico). Los perfiles estratigráficos muestran un proceso de sedimentación en el que se definen claramente dos depósitos, a saber:

Un depósito reciente de una sucesión de arenas finas y limos arcillosos de alta y baja compresibilidad, que en los sondeos analizados se encuentran hasta profundidades de 5.5 m y 8.25 m

El segundo depósito lo constituye una arena fina que subyace a la anterior, hacia abajo la arena alcanza grados de alta compacidad y se han encontrado relictos de roca sedimentaria arenisca. Para los sondeos analizados, la arena está hasta los 20 m.

### **3.1.3.3 Respecto a los acuíferos**

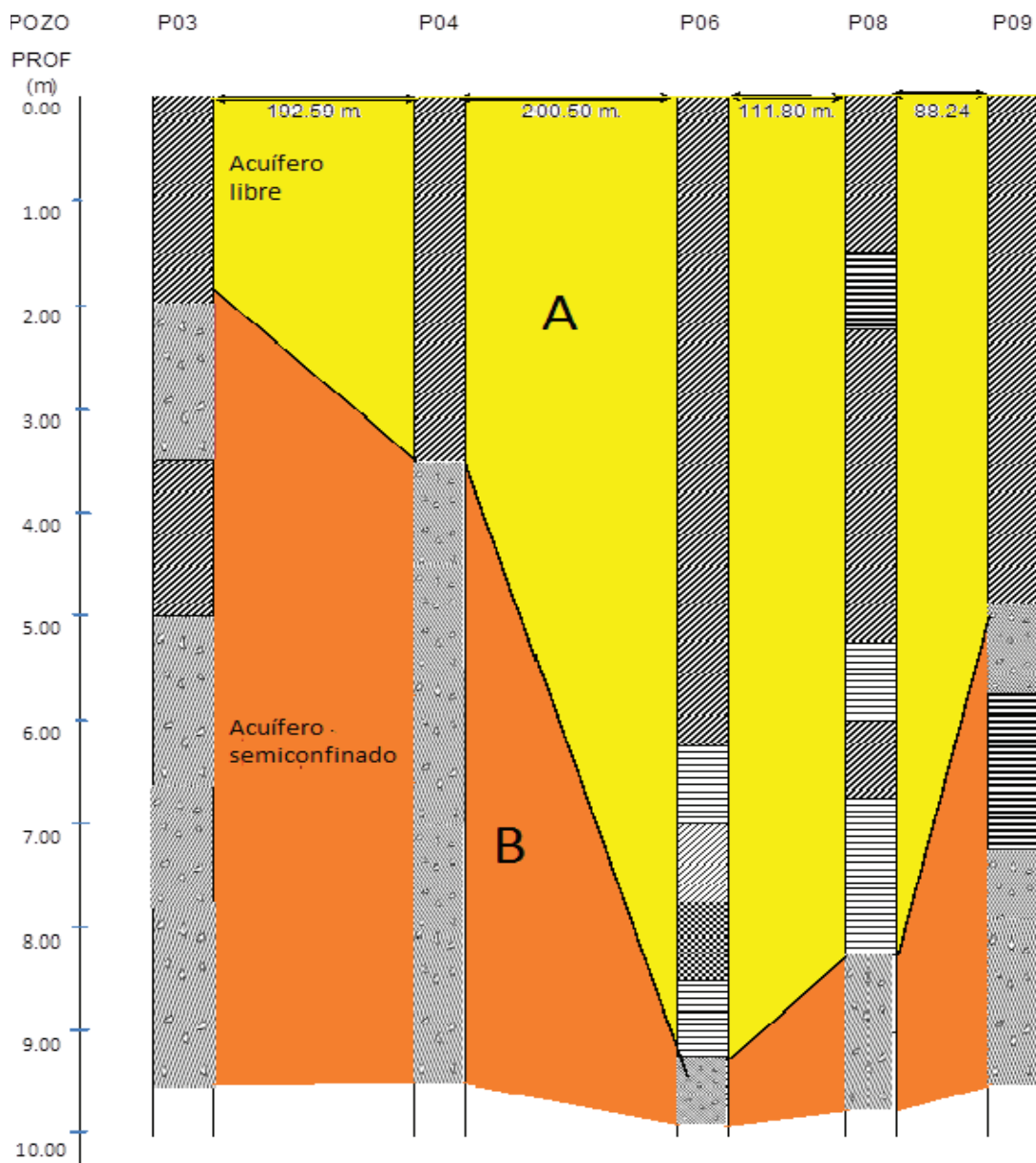
Del análisis de la secuencia estratigráfica se deduce que el depósito sedimentario superior con un predominio de limos arcillosos con lentes de arena fina que forman un acuífero libre el mismo que sobreyace a un estrato de arenas finas que conforman un acuífero semiconfinado cuyas aguas de recarga, son las aguas de filtración originadas por las lluvias, aportes desde el estero y desde el acuífero regional que debe estar ubicado más abajo del acuífero somero.

El depósito subyacente o arenas constituyen un acuífero confinado por el anterior y el flujo subterráneo tiene su recarga a nivel regional e inclusive desde el estero Sapito. El espesor del estrato de arenas finas medido mediante los pozos de exploración varía entre 5.5 m hasta 8.25 m.

De manera que, existen dos acuíferos uno superficial libre y uno hacia abajo que está semiconfinado por las condiciones de permeabilidad del superficial.

Debe aclararse que entre el contacto del estrato limo arcillo y la arena inferior existe una capa de arena con aguas de capilaridad, esta condición se demuestra en los perfiles estratigráficos, donde se observan que las humedades hacia mayor profundidad tienden a disminuir hasta la profundidad del nivel freático.

Al realizar una secuencia tanto de los perfiles estratigráficos tanto de los ensayos someros como de los profundos Figuras 3.16 y 3.17 se puede observar la secuencia estratigráfica deducida con los perfiles geosísmicos solapados donde la capa de limos y arcillas corresponde al estrato A y la arena fina al estrato B.



A) Limos y arcillas, B) Arenas finas

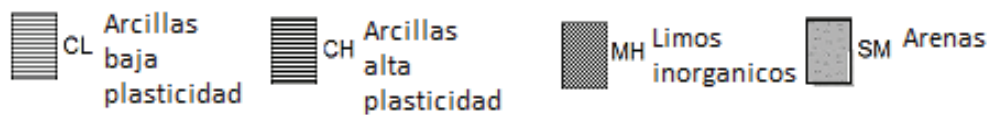
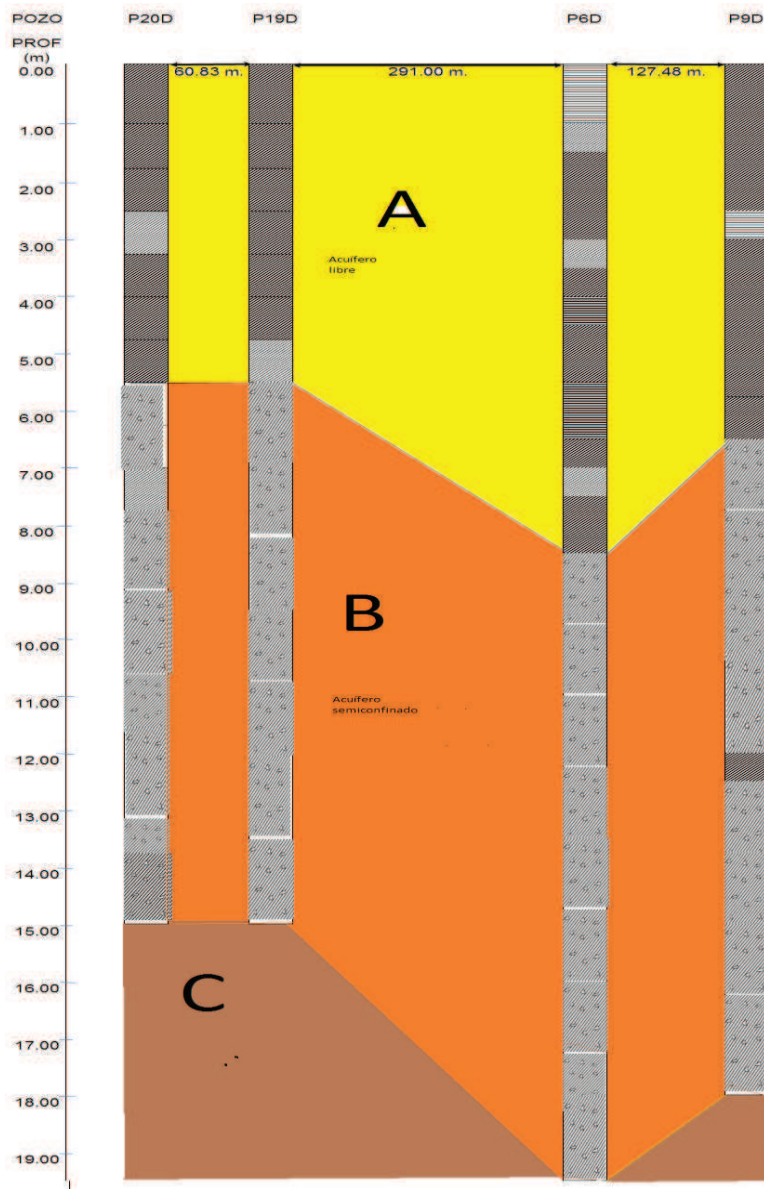


Figura 3.16: Perfil estratigráfico pozos someros



A) Limos y arcillas, B) Arenas finas, C) Roca arenisca

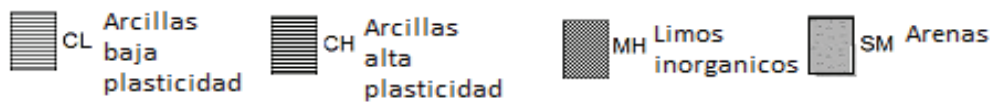
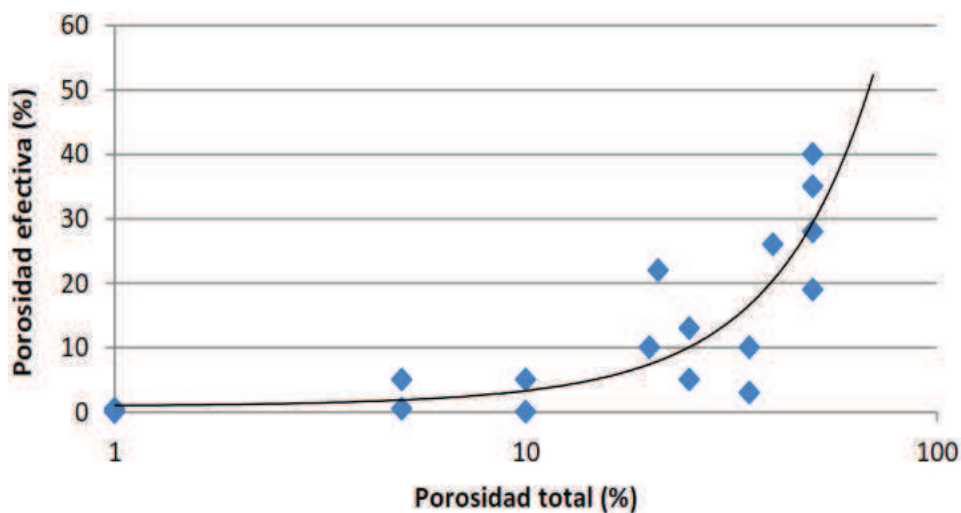


Figura 3.17: Perfil estratigráfico pozos profundos

### 3.1.3.4 Respecto a humedades, gravedades específicas, porosidad total, porosidad efectiva

Para el cálculo de la porosidad efectiva de los suelos se utiliza la relación experimental (Sanders, 1998) entre los valores de porosidad total y efectiva que se graficaron en la Figura 3.17.



**Figura 3.18: Porosidad total vs porosidad efectiva. Fuente modificada de Sanders (1998)**

Como se anota en la Tabla 3.2 a partir los valores de humedades, y de la gravedad específica de los suelos, se puede calcular una porosidad total. En cambio, utilizando el gráfico de Sanders es posible calcular con buena aproximación valores de porosidad efectiva.

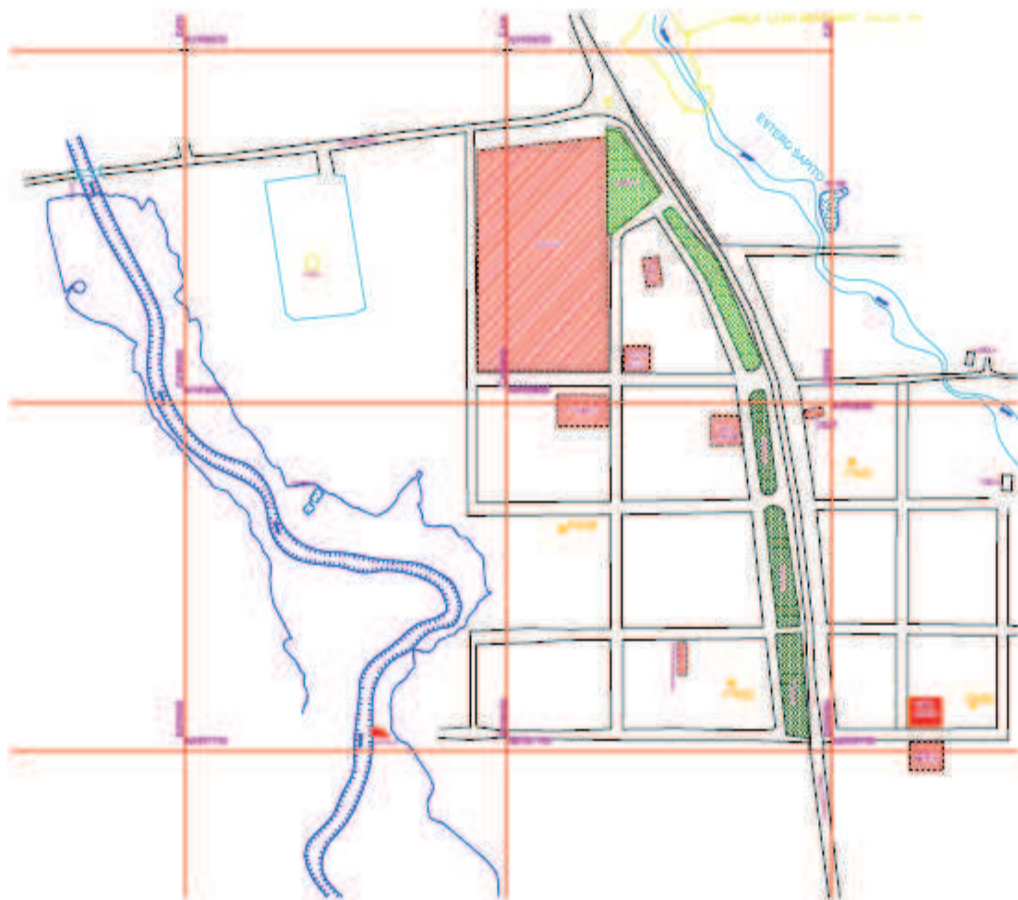
**Tabla 3.2**  
**Gravedad específica, porosidad**

No.	POZO	PROFUNDIDAD (m)		IDENTIFICACIÓN MANUAL VISUAL	% HUMEDAD NATURAL	GRAVEDAD ESPECÍFICA	Porosidad total	Porosidad efectiva (*)
1	P5D	6.5	a 7	Limo	44.92%	2.738	55	22
2	P5D	18	a 19	Arena	17.42%	2.475	30	14
3	P6D	1.5	a 2	Limo	45.02%	2.793	56	22
4	P6D	14.5	a 15.25	Arena	19.15%	2.883	36	16
5	P7D	1.5	a 2	Limo	61.24%	2.799	63	23
6	P7D	14.25	a 15	Arena	25.54%	2.878	42	18
7	P8D	0.5	a 1	Limo	54.40%	2.741	60	23
8	P9D	1.5	a 2	Limo	54.80%	2.576	59	23
9	P9D	17.25	a 18	Arena	18.14%	2.869	34	15
10	P10D	3.4	a 4.25	Limo	52.24%	2.677	58	22
11	P10D	11.25	a 12	Arena	35.07%	2.814	50	20
12	P12D	5	a 5.75	Limo	72.14%	2.51	64	24
13	P12D	17.5	a 18.25	Arena	28.88%	2.808	45	19
14	P13D	17.5	a 18.25	Arena	23.95%	2.912	41	18
15	P16D	13.25	a 13.75	Arena	18.94%	2.884	35	16
16	P18D	2	a 2.75	Limo	46.76%	2.704	56	22
17	P19D	2.5	a 3.25	Limo	48.66%	2.634	56	22
18	P20D	1.75	a 3.5	Limo	54.66%	2.618	59	23
19	P22D	1	a 1.75	Limo	32.14%	2.783	47	20
20	P24D	8	a 8.75	Arena	26.20%	1.896	33	15
21	P25D	4.25	a 5	Limo	58.24%	2.759	62	23
22	P26D	1.5	a 2	Arena	28.00%	1.47	29	13
23	P27D	0.4	a 1	Limo	48.89%	2.804	58	22
24	P27D	3.5	a 4	Arena	22.95%	2.711	38	17
25	P28D	1.5	a 2	Limo	73.99%	2.603	66	24
26	P28d	3.5	a 4	Arena	28.93%	2.789	45	19
27	P29D	1.5	a 2	Limo	64.91%	2.57	63	23
28	P30D	1	a 1.5	Limo	64.91%	2.62	63	23
29	P30D	3.5	a 4	Arena	24.43%	2.771	40	18
30	P31D	1	a 1.5	Limo	52.78%	2.706	59	23
31	P31D	2.5	a 3	Arena	31.40%	2.778	47	19

### 3.1.4 Resultados geohidráulicos

#### 3.1.4.1 Ensayos de bombeo

Los sitios donde se realizaron los ensayos de bombeo se pueden apreciar en el siguiente mapa de la figura 3.18



**Figura 3.19: Ubicación ensayos de bombeo**

#### **3.1.4.2 Resultados ensayos de bombeo**

En la Tabla 3.3 se anotan los resultados de los ensayos de bombeo realizados en los pozos artesanales, en diferentes ubicaciones del área de estudio, las permeabilidades encontradas corresponden al estrato de limos y arcillas con lentes de arena (acuífero libre) al acuífero semiconfinado constituido por arenas finas.

Se anotan los resultados de las permeabilidades en dirección horizontal  $K_x$  y se calcula un valor promedio para la permeabilidad en dirección vertical  $K_z$ . Para los acuíferos no confinado y confinado respectivamente.

A continuación se anota un ejemplo de cálculo para las permeabilidades para lo cual se utilizan las ecuaciones de Darcy para acuíferos confinados y no confinados (Bedient, Rifai, & Newell, 1999).

### **Determinación de K en acuífero confinado**

Según la ley de Darcy

$$T = Kb = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

$h_2, h_1$ : alturas de agua en los pozos de observación adyacentes

$r_2, r_1$ : radios desde el pozo de bombeo hasta los pozos de observación

$b$ : altura acuífero

$Q$ : caudal de bombeo

### **Determinación de K en acuífero no confinado**

$$K = \frac{Q}{2\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

$h_2, h_1$ : alturas de agua en los pozos de observación adyacentes

$r_2, r_1$ : radios desde el pozo de bombeo hasta los pozos de observación

$Q$ : caudal de bombeo



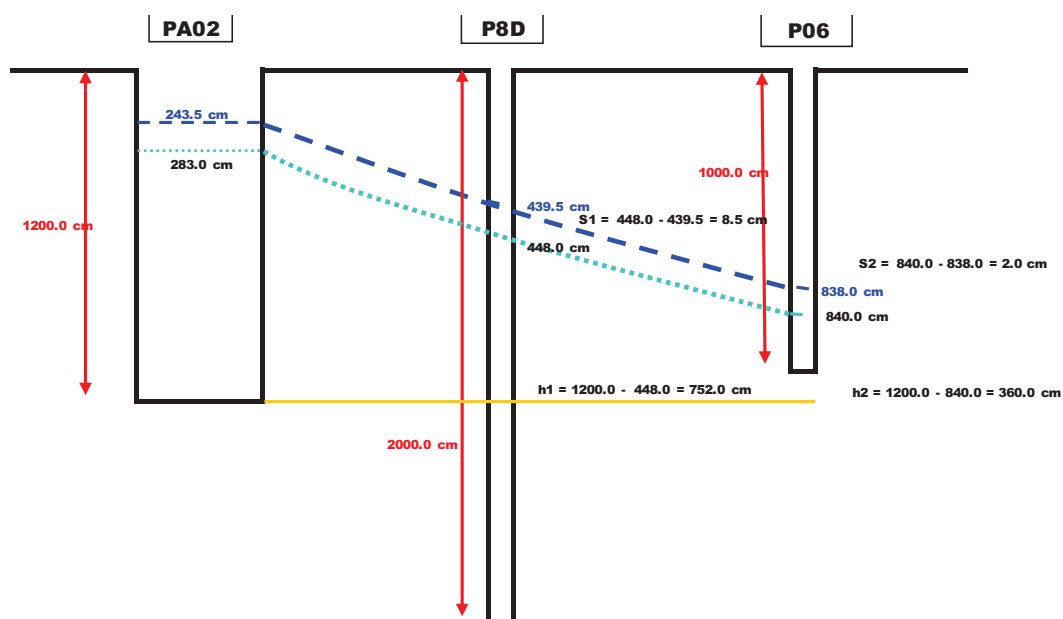


Figura 3.20: Ensayo bombeo pozo PA02

Tabla 3.3.

Resultados de ensayos de bombeo para determinación de permeabilidades

Pozos artesanales de ensayo	Localización	Q	s1	h1	r1	s2	h2	r2	b	Kx	Kx	Kz	T
		cm <sup>3</sup> /seg	cm	(cm)	(m)	cm	(cm)	(m)	(m)	(cm/seg)	(m/seg)	(m/seg)	(cm <sup>2</sup> /seg)
<b>Acuífero libre</b>													
PA01	18290516E, 9967957N	55.0	257.0	298	34	5.0	555	124		2.25E-05	2.25E-07		
PA02	18290445E, 9957797N	55.6	2.0	360	96	8.5	992	140		1.70E-06	1.70E-08		
PA03	18290444E, 9957820N	55.6	69.0	164.5	18	16	223	130		3.35E-04	3.35E-06		
PA04A	18290384E, 9958008N	969.3	-53.0	28	107	-3	110	140		1.59E-03	1.59E-05		
PA05	18290469E, 9958136N	1125.8	50.0	335	37	-3	1872	130		2.88E-05	2.88E-07		
											1.43E-06	1.43E-07	
<b>Acuífero semiconfinado</b>													
PA07	18290609E, 9957784N	317.5	0.0	890	65	0	1025	150	23.30	5.83E-03	5.83E-05		1.36E-03
PA08	18290375E, 9957930N	506.7	11.0	288	130	1	373	160	35.6	2.40E-03	2.40E-05		8.55E-04
PA09	18290415E, 9958186N	450	0.0	768	83	0	1043	180	38.9	2.25E-03	2.25E-05		8.76E-04
										Promedio	3.50E-05	3.50E-06	1.03E-03

Los ensayos de permeabilidad de campo se verificaron con un ensayo de laboratorio empleando un permeámetro de carga constante. Es importante anotar que las condiciones como la granulometría, compacidad y gradiente hidráulica van a modificar los valores de coeficientes de permeabilidad calculados en condiciones in situ, en todo caso en laboratorio se obtuvo un valor de 2.0068E-6 (cm/seg).

“Debido a la variación en la naturaleza de los sedimentos en dirección vertical y a la orientación de las partículas, suele ser usual una relación de 2 a 10 entre las permeabilidades horizontal y vertical para una arcilla normalmente consolidada. En los depósitos naturales la permeabilidad horizontal tiende a ser mayor que la vertical” (Lambe & Whitman, 2002). Para efectos del modelo  $K_x$ ,  $K_y$  se considera permeabilidades horizontales y se consideran de igual valor,  $K_z$  es permeabilidad vertical 10 veces menor que las anteriores, considerando el criterio de Lambe.

### **3.1.4.3 Medida de caudales en diferentes sitios del río y estero**

La medida de los caudales o aforos en los diferentes sitios correspondientes al río Huamayacu y al estero Sapito se realizó utilizando un micromolinetete instrumento que mide velocidades de flujo y permite realizar un perfil del cauce del río que sirven para calcular los caudales en el río.

Se eligieron tres sitios en el río Huamayacu y tres sitios en el estero Sapito de tal forma que coincidan con las locaciones extremas al inicio y al final de la frontera del área de estudio y un sitio intermedio. Los resultados de estos ensayos se presentan en los siguientes cuadros:

**Tabla 3.4**

#### **Aforos en el río Huamayacu**

<b>Sitio</b>	<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Aforo (m<sup>3</sup>/s)</b>
Puente 1 (vía a río napo)	957948, 9958196	1.268
Propiedad Sr. Tipán	957828, 9957959	1.252
Salida alcantarilla	958151, 9957801	7.73

**Tabla 3.5**

#### **Aforos en estero Sapito**

<b>Sitio</b>	<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Aforo (m<sup>3</sup>/s)</b>
Salida de alcantarilla Sacha sur	958531, 9958503	0.0099
Diagonal a escuela en San Carlos	958365, 9958279	0.001
Aguas debajo de dique	958435, 9958210	0.00023

De los valores de aforos medidos se puede observar que en el río Huamayacu hacia aguas abajo aumenta el caudal mientras que en estero Sapito a pesar de tener un aforo muy bajo, éste tiende a disminuir.

#### **3.1.4.4 Medida de los niveles de agua**

##### **Niveles freáticos**

La profundidad del nivel freático fue medida en cada uno los sondeos realizados, en diferentes fechas y se anotaron en un registro. Se observa principalmente que desde Mayo a Julio, se da una disminución de la profundidad a la que se encuentran las cotas de agua en los diferentes sondeos, lo cual demuestra que el nivel freático reportado en los sondeos depende de la cantidad de agua filtrada desde la superficie por efectos de la estación lluviosa y aporte de un acuífero a nivel regional.

Es decir, llueve y sube la cota del nivel de agua freática, deja de llover y sucede lo contrario.

Se puede anotar que existe una profundidad máxima de abatimiento 6,50 m.

##### **Cotas del nivel de agua**

En los sondeos se midieron las profundidades del nivel de agua en diferentes fechas, estos datos proporcionan una primera imagen real de las condiciones de flujo de acuífero en la capa superior conformado por limos (acuífero superior) y su variación con respecto al tiempo.

En Tabla 3.7 se resumen los datos de campo y profundidades del nivel freático tomadas desde el inicio de los sondeos de campo en el mes de Enero del 2009 hasta el mes de Julio del 2011. Se anotan la identificación del pozo, la fecha de la medida, la hora, y la profundidad del nivel freático en ese instante, se añade una columna en la que se incluye el tiempo transcurrido desde la primera medida.

Los registros de tiempo versus profundidad del nivel freático se grafican en la Figura 3.18. Se puede apreciar que por ejemplo que en el P02D ubicado hacia el oeste del área urbana la máxima profundidad alcanzada por el nivel freático es de 10.42 m y en P05 hacia el este del área urbana es de 7.50m, luego existe un carga hidráulica que produce el movimiento del agua subterránea.

El Pozo P11 que está frente al coliseo del pueblo se aprecia una recuperación total en un tiempo de 714, días por lo que en esta dirección el suelo necesariamente tiene una porosidad mayor.

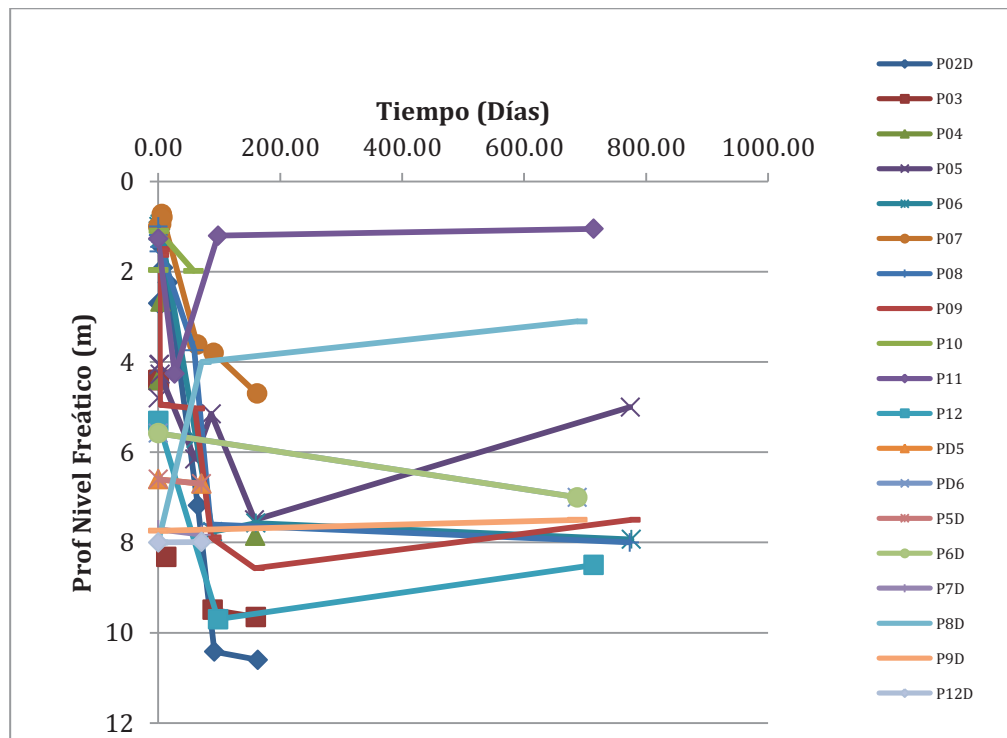
**Tabla 3.6.**

**Profundidades del nivel freático en varias fechas**

Pozo No.	Fecha	Tiempo transcurrido (días)	Hora	Cota espejo de agua (m)	
P01	19/05/2009	0.00			
	26/05/2009	7.00	18:30		
	27/05/2009	1.00			
	28/05/2009	1.00	12:07		
	05/06/2009	8.00			
	24/07/2009	49.00	10:12		
P02D	20/05/2009	0.00		2.7	
	26/05/2009	6.00	18:10	2.7	
	27/05/2009	7.00	17:38	1.47	
	28/05/2009	8.00	11:36	1.91	
	05/06/2009	16.00		2.24	
	24/07/2009	65.00	12:00	7.18	
	20/08/2009	92.00	15:46	10.42	
	30/10/2009	163.00	15:39	10.6	
P03	23/05/2009	0.00		4.4	
	24/05/2009	1.00	11:15	4.40	
	26/05/2009	3.00	18:10		
	27/05/2009	4.00	17:38		
	28/05/2009	5.00	11:40		
	05/06/2009	13.00		8.32	
	24/07/2009	62.00	11:50		
	20/08/2009	89.00	14:56	9.49	
	30/10/2009	160.00	15:16	9.65	
					4.4
P04	24/05/2009	0.00			
	26/05/2009	2.00	18:30		
	27/05/2009	3.00	17:51		
	28/05/2009	4.00	11:33	2.66	
	24/07/2009	61.00	11:30		
	30/10/2009	159.00	13:58	7.85	
P05	25/05/2009	0.00	12:50	4.80	
	26/05/2009	1.00	18:30	4.07	
	27/05/2009	2.00	17:51	4.05	
	28/05/2009	3.00	8:36	4.27	
	24/07/2009	60.00	10:45	6.15	
	20/08/2009	87.00	9:10	5.15	
	30/10/2009	158.00	12:28	7.5	
	08/07/2011	774.00	14:05	5	
P06	23/05/2009	0.00	9:20	1.10	
	24/05/2009	1.00	13:40	1.00	
	26/05/2009	3.00	18:30	0.95	
	27/05/2009	4.00	17:51	1.25	
	28/05/2009	5.00	11:06	1.15	
	24/07/2009	62.00	12:17	5.7	
	20/08/2009	89.00	12:06	7.76	
	30/10/2009	160.00	13:37	7.57	
	08/07/2011	776.00	11:15	7.93	

Continua  
→

P07	21/05/2009	0.00	10:00	1.00
	26/05/2009	5.00	18:10	0.95
	27/05/2009	6.00	17:51	0.72
	28/05/2009	7.00	11:32	0.79
	24/07/2009	64.00	11:55	3.61
	20/08/2009	91.00	15:23	3.8
	30/10/2009	162.00	15:29	4.7
P08	26/05/2009	0.00	17:05	1.00
	26/05/2009	0.00	18:30	1.19
	27/05/2009	1.00	17:51	1.55
	28/05/2009	2.00	9:32	1.45
	24/07/2009	59.00	11:20	3.74
	20/08/2009	86.00	11:05	7.6
	08/07/2011	773.00	12:28	8
P09	25/05/2009	0.00	10:00	1.50
	26/05/2009	1.00	18:55	1.63
	27/05/2009	2.00	17:51	1.50
	28/05/2009	3.00	9:51	4.95
	24/07/2009	60.00	11:02	5.03
	20/08/2009	87.00	10:16	7.89
	30/10/2009	158.00	13:12	8.57
	08/07/2011	774.00	11:02	7.5
P10	27/05/2009	0.00	12:58	1.96
	28/05/2009	1.00	11:45	1.1
	24/07/2009	58.00	11:02	1.98
P11	24/07/2009	0.00	11:35	1.27
	20/08/2009	27.00	12:54	4.26
	30/10/2009	98.00	14:13	1.2
	08/07/2011	714.00	14:45	1.05
P12	24/07/2009	0.00	10:12	5.31
	30/10/2009	98.00	11:41	9.7
	08/07/2011	714.00	6:14	8.5
P5D	20/08/2009	0.00	9:58	6.6
	30/10/2009	71.00	11:58	6.7
P6D	20/08/2009	0.00	11:49	5.58
	08/07/2011	687.00	11:26	7
P7D	20/08/2009	0.00	8:30	7.71
	30/10/2009	71.00	11:16	7.83
P8D	20/08/2009	0.00	11:28	8
	30/10/2009	71.00	12:36	4
	08/07/2011	687.00	12:05	3.1
P9D	20/08/2009	0.00	10:20	7.74
	08/07/2011	687.00	13:27	7.5
P12D	20/08/2009	0.00	8:46	8
	30/10/2009	71.00	11:27	7.99
P18D	30/10/2009	0.00	14:49	5.22
P19D	30/10/2009	0.00	14:58	8.38
P20D	30/10/2009	0.00	15:06	9.4
P21D	30/10/2009	0.00	14:00	4.0



**Figura 3.21: Variación de profundidad nivel freático con el tiempo en los sondeos del área urbana.**

### Pozo de junta de agua

El pozo de La Junta de Agua, del cual se extrae agua subterránea para consumo de San Carlos, tiene una profundidad de aproximadamente 38 m., pero el nivel del espejo de agua constante está a 12 m. por debajo de la boca del pozo. Por lo tanto se tomará esta profundidad como referencial para el “Nivel Freático Inicial” en el modelo. En este pozo se explota con un caudal de 43.2 m<sup>3</sup>/día. Otros datos respecto al pozo de la junta se reportan en el siguiente cuadro

Tabla 3.7

Datos funcionamiento pozo agua subterránea de la Junta parroquial.

Pozo existente funcionando	Profundidad Sondeo (m)	Fecha	Hora	Cota espejo de agua (m)
	38	28/05/2009	10:30	9.55
		28/05/2009	14:30	9.7

Nota: La bomba se prendió a las 10:40 y se apagó 14:20

### 3.2 RESULTADOS DE MINERALOGÍA, ÓXIDOS, METALES PESADOS.

#### 3.2.1 Facciones mineralógicas

Minerales arcillosos.- Para el estrato superior en estudio, el análisis mineralógico determinó que los limos arenosos están conformados por: caolinita y halloysita.

#### ENSAYO ORIENTADO: MINERALES ARCILLOSOS

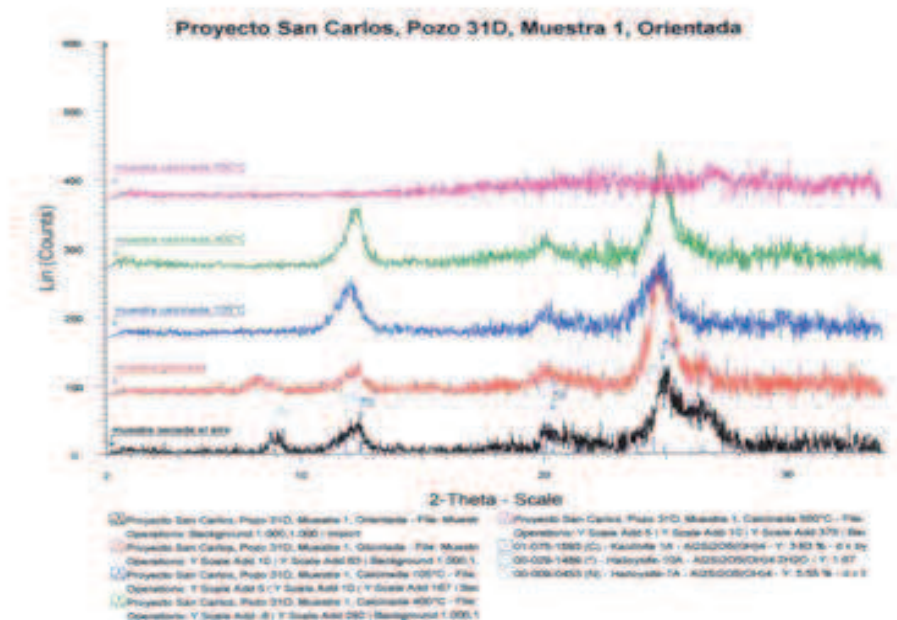


Figura 3.22: Determinación de minerales arcillosos. Fuente autor

Análisis mineralógico total de la arena.- Se determina que está conformada por los siguientes minerales: andesina 50%, diópsido 21% , filossilicatos 12 %, cuarzo 10, hematita 4%, cristobalita 3%, esta última es cancerígena.

## ENSAYO MINERALÓGICO TOTAL

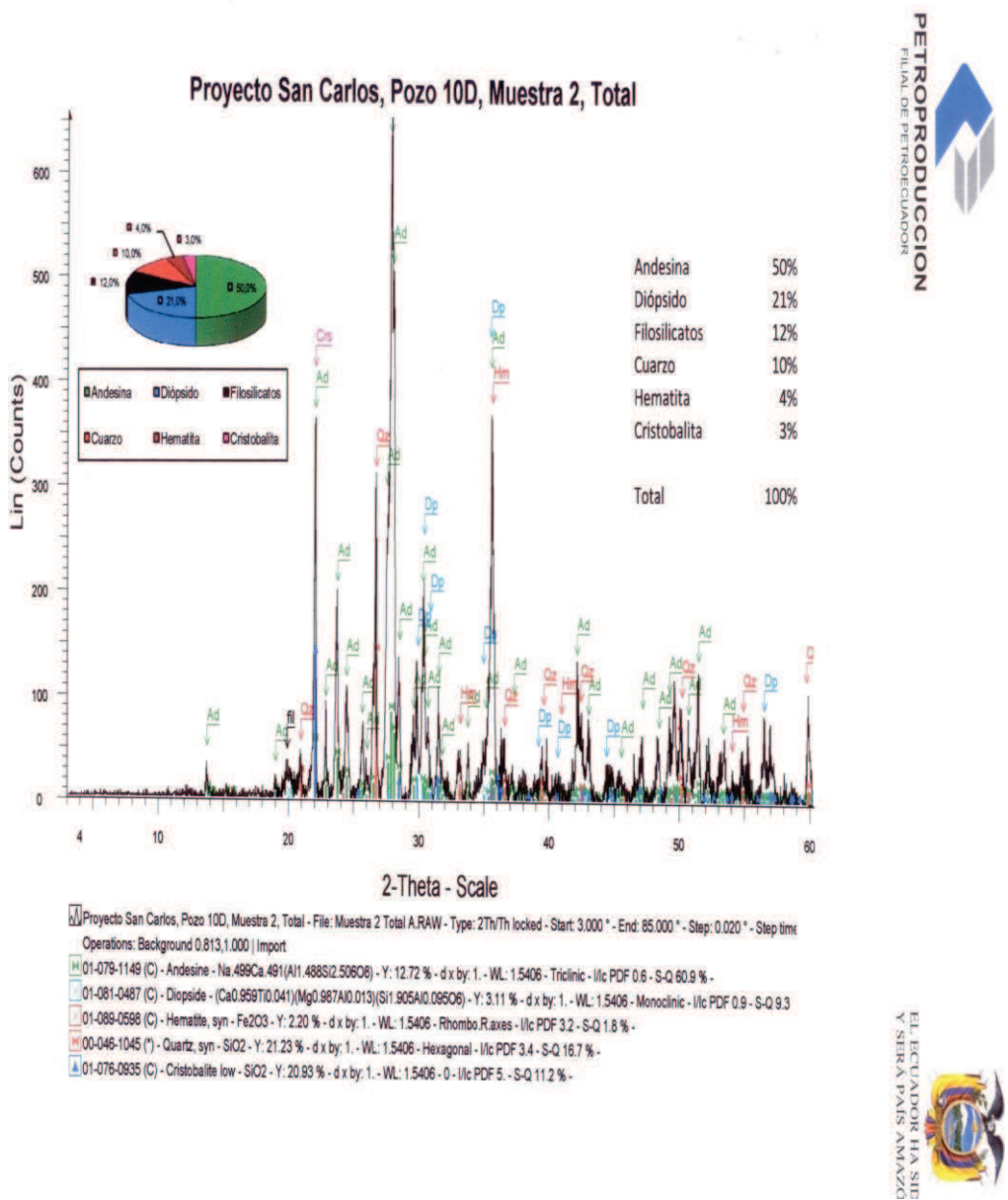


Figura 3.23: Ensayo mineralógico total. Fuente autor



### 3.2.2 Concentración de óxidos metálicos

Se recuperaron muestras a los 6 m de profundidad de los pozos P-4, P-18, P-19 debido a que el flujo agua por pendiente natural tiende en esa dirección hacia el río Huamayacu. El pozo P-5 está en dirección del flujo hacia el estero Sapito.

La concentración de óxidos metálicos se anota en la Tabla 3.9

**Tabla 3.8**

**Determinación general semicuantitativa de óxidos.**

Concentraciones en peso (%)				
Óxido	P-4	P-5	P-18	P-19
Na <sub>2</sub> O	1.39		2.22	7.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.9	43.7	38.2	32.9
SiO <sub>2</sub>	50.9	44.9	42.2	44.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.78	9.01	13.5	9.23
CaO	-	2.48	-	-
MgO	-	-	1.64	5.38
TiO <sub>2</sub>	-	-	2.22	-

La concentración de óxidos, muestra mayor abundancia de SiO<sub>2</sub>, en especial en la muestra P-4 (50,89%).

Otra concentración de óxidos importante, es la de aluminio, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en especial en la muestra P-5 (43,66%).

El promedio de óxido de hierro Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de las 4 muestras arcillosas, es de 10,12%.

Solamente en la muestra P-18, el EDAX detecta TiO<sub>2</sub> en una concentración de 2.22%.

Ningún óxido de manganeso fue detectado.

En los siguientes cuadros constan las concentraciones de Ni, Cd, Pb y V tanto en agua como en suelo.

### 3.2.3 Concentración de metales pesados Níquel Ni, Cadmio Cd, Plomo Pb y Vanadio V. en agua y suelo

**Tabla 3.9**

**Valores de concentración del Cadmio**

Muestra(kg)	m=	0.002
Volumen(L)	V=	0.05
ID Muestra	Concentración en el agua (mg/L)	Contenido en el suelo (mg/kg)
P -2D	0.007	0.175
P – 03	0.007	0.167
P – 04	0.009	0.237
P – 05	0.008	0.21
P -5D	0.008	0.195
P -06	0.012	0.29
P- 6D	0.012	0.304
P – 07	0.009	0.226
P -7D	0.012	0.291
P -08	0.012	0.299
P -8D	0.014	0.343
P – 09	0.012	0.296
P - 9D	0.011	0.285
P – 10	0.011	0.278
P -11	0.011	0.283
P – 12	0.009	0.218
P - 12D	0.008	0.191
P - 18D	0.01	0.25
P-19D	0.009	0.213
P-20D	0.008	0.204

**Tabla 3.10**  
**Valores de concentración del Níquel**

Muestra (kg)	m =	0.002
Volumen (L)	v =	0.05
ID Muestra	Concentración en el agua (mg/L)	Concentración en el suelo (mg/kg)
P -2D	2.364	59.093
P – 03	0.173	4.337
P – 04	0.004	0.09
P – 05	-0.126	ND
P -5D	0.095	2.366
P -06	-0.007	ND
P- 6D	0.133	3.313
P – 07	0.175	4.375
P -7D	0.614	15.355
P -08	0.04	1.009
P -8D	0.011	0.263
P – 09	-0.041	ND
P - 9D	-0.057	ND
P – 10	-0.058	ND
P -11	0.049	1.235
P – 12	-0.108	ND
P - 12D	-0.102	ND
P - 18D	0.053	1.33
P-19D	0.138	3.457
P-20D	-0.142	ND

**Tabla 3.11**  
**Valores e concentración del Plomo**

Muestra (kg)	m=	0.002
Volumen (L)	v =	0.05
ID Muestra	Concentración en el agua (mg/L)	Concentración en el suelo (mg/kg)
P -2D	0.794	19.84
P – 03	0.717	17.923
P – 04	0.568	14.198
P – 05	0.774	19.343
P -5D	0.597	14.916
P -06	0.495	12.382
P- 6D	0.622	15.541
P – 07	0.624	15.594
P -7D	0.649	16.222
P -08	0.666	16.651
P -8D	0.56	14.001
P – 09	0.567	14.174
P - 9D	0.74	18.508
P – 10	0.583	14.57
P -11	0.68	17.009
P – 12	0.73	18.256
P - 12D	0.694	17.349
P - 18D	0.859	21.475
P-19D	0.718	17.947
P-20D	0.7	17.511

**Tabla 3.12****Valores de concentración del Vanadio**

Muestra (kg)	m=	0.002
Volumen (L)	v=	0.05
ID Muestra	Concentración en el agua (mg/L)	Concentración en el suelo (mg/kg)
P -2D	5.549	138.725
P – 03	7.18	179.5
P – 04	6.101	152.525
P – 05	5.921	148.025
P -5D	4.099	102.475
P -06	3.277	81.925
P- 6D	2.424	60.6
P – 07	3.313	82.825
P -7D	3.178	79.45
P -08	4.495	112.375
P -8D	3.014	75.35
P – 09	3.372	84.3
P - 9D	3.524	88.1
P – 10	3.05	76.25
P -11	4.854	121.35
P – 12	5.514	137.85
P - 12D	5.599	139.975
P - 18D	3.607	90.175
P-19D	5.446	136.15
P-20D	5.531	138.275

Al tener datos de muchos pozos, entonces se ha optado por calcular un promedio de las concentraciones que para el caso sería representativo de todo el subsuelo del área urbana de San Carlos y con estos promedios proceder a calcular un valor de  $K_d$  para cada metal como se observa en el Tabla 3.13.

En las Figuras 3.22 a 3.25 se grafican los valores de las concentraciones de los metales encontrados en el agua (bibliográficos de los mismos pozos medidos en el CEINCI) versus los valores de las concentraciones encontrados en el suelo y se nota claramente que la distribución sigue un modelo de sorción lineal, razón por la cual se anota en la tabla 3.14 un valor de  $K_d$  para estas condiciones sin tomar en cuenta el pH; más adelante se calcula el valor de  $K_d$  considerando el pH y los resultados cambian.

Tabla 3.13

Cálculo coeficientes de distribución para Níquel, Cadmio, Plomo y Vanadio.

X	Y	WELL ID	COTA BASE POZO (CSN M)	TIEMPO OBS (DÍAS)	NIQUEL/SUELO Cs	NIQUEL/A GUA Cw	CADMIO/SUELO Cs	CADMIO/AGUA Cw	PLOMO/SUELO Cs	PLOMO/A GUA Cw	VAN/SUELO Cs	vanadio/A GUA Cw
290040.1877	9958128.8300	P2D	251	158	2.36	59.09	0.01	0.18	0.79	19.84	5.55	0.002
290638.3174	9957930.2290	P5D	247	158	0.09	2.37	0.01	0.19	0.60	14.92	4.10	0.002
290492.9025	9957920.8603	P6D	251	158	0.13	3.31	0.01	0.30	0.62	15.54	2.42	0.000
290510.6127	9958008.4955	P7D	250	158	0.61	15.35	0.01	0.29	0.65	16.22	3.18	0.003
290497.4650	9957861.8355	P8D	251	158	0.01	0.26	0.01	0.34	0.56	14.68	3.01	0.000
290616.8131	9957849.8232	P9D	251	158	0.00	0.00	0.01	0.28	0.74	18.51	3.52	0.003
290556.5787	9958011.0805	P12D	248	158	0.00	0.00	0.01	0.19	0.69	17.35	5.60	0.000
290307.7059	9958175.1782	P18D	251	158	0.05	1.33	0.01	0.25	0.86	21.48	3.61	0.002
290248.2193	9958053.3581	P19D	250	158	0.14	3.46	0.01	0.21	0.72	17.95	5.45	0.000
290201.4909	9958100.9868	P20D	251	158	0.00	0.00	0.01	0.20	0.70	17.51	5.53	0.000
290104.0585	9958056.1774	P03	261	158	0.17	4.34	0.01	0.17	0.72	17.92	7.18	0.000
290273.9332	9957913.8891	P04	262	158	0.00	0.09	0.01	0.24	0.57	0.00	6.10	0.003
290623.3081	9957919.1551	P05	259	158	0.00	0.00	0.01	0.21	0.77	19.34	5.92	0.002
290433.2895	9957901.9223	P06	261	158	0.00	0.00	0.01	0.29	0.50	12.38	3.28	0.000
290151.6547	9958115.5211	P07	261	158	0.18	4.38	0.01	0.23	0.62	15.59	3.31	0.000
290543.2457	9957846.8806	P08	261	158	0.04	1.01	0.01	0.30	0.67	16.65	4.50	0.000
290623.3183	9957826.7088	P09	261	158	0.00	0.00	0.01	0.30	0.57	14.17	3.37	0.000
290573.9273	9957737.2206	P10	264	158	0.00	0.00	0.01	0.28	0.58	14.57	3.05	0.000
290345.8930	9957990.5326	P11	265	158	0.05	1.23	0.01	0.28	0.68	17.01	4.85	0.000
290558.4847	9957997.7443	P12	258	158	0.00	0.00	0.01	0.22	0.73	18.26	5.51	0.000
PROMEDIOS					0.1924	4.8111	0.0099	0.2477	0.6668	15.9944	4.4524	0.0008
Kd Coeficiente dispersión					0.0400		0.0400		0.0417		5708.2051	
Kd = Cs/Cw según: <a href="http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream">http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream</a>												
Kd = coeficiente de distribución del contaminante												
Cs = Concentración del contaminante en la fase sólida												
Cw = Concentración de contaminante en la fase líquida												

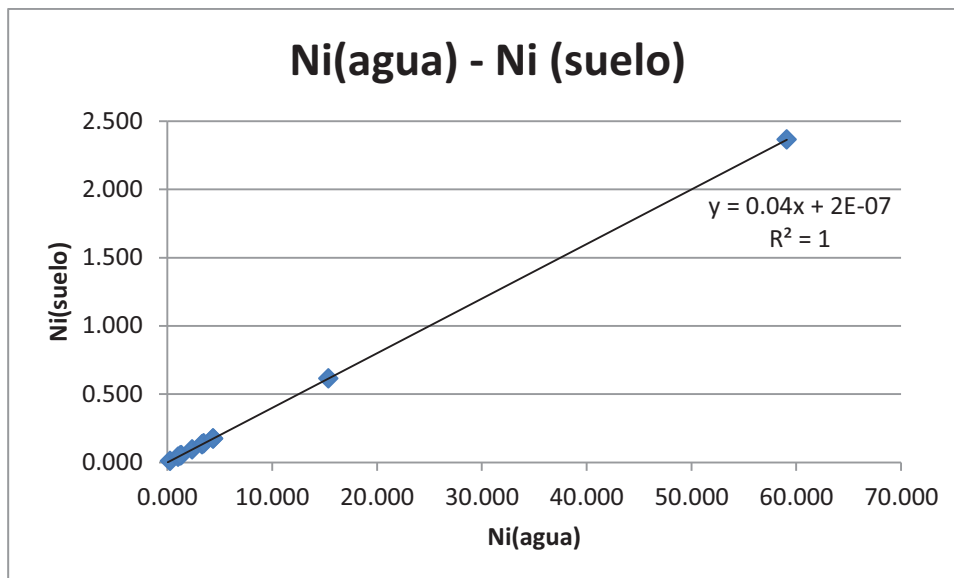


Figura 3.24: Concentración de Ni en suelo vs Ni en agua

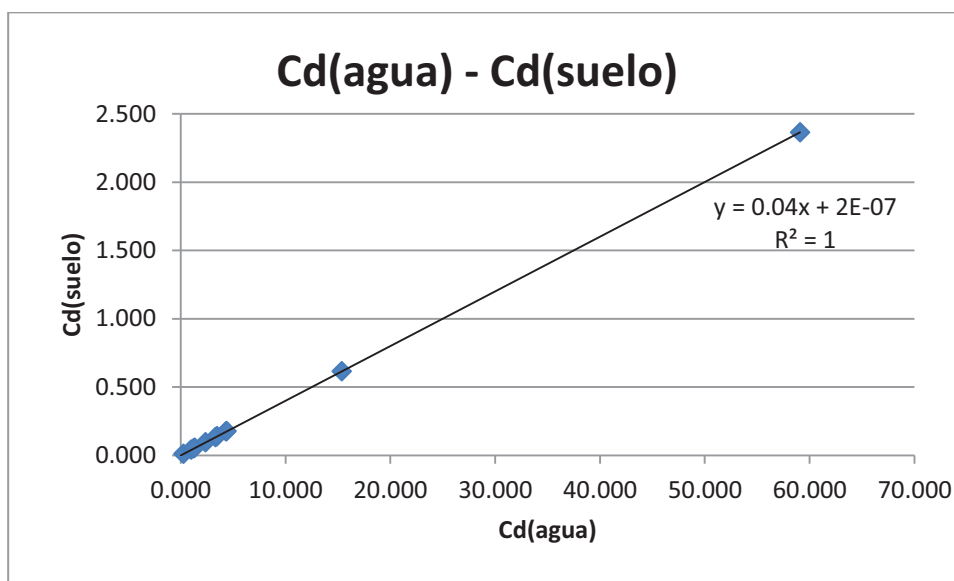


Figura 3.25: Concentraciones de Cd en suelo vs Cd en agua



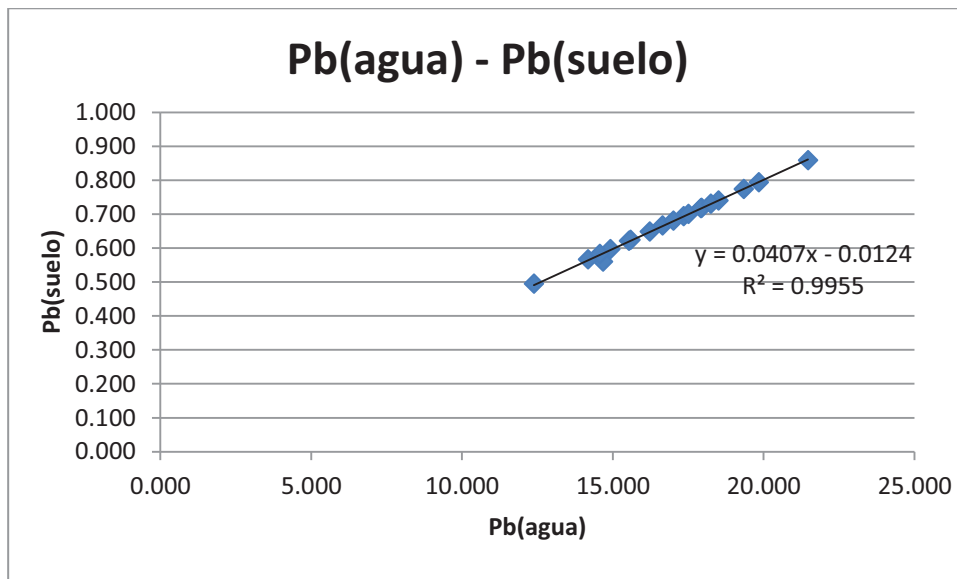


Figura 3.26: Concentraciones de Pb en suelo vs Pb en agua

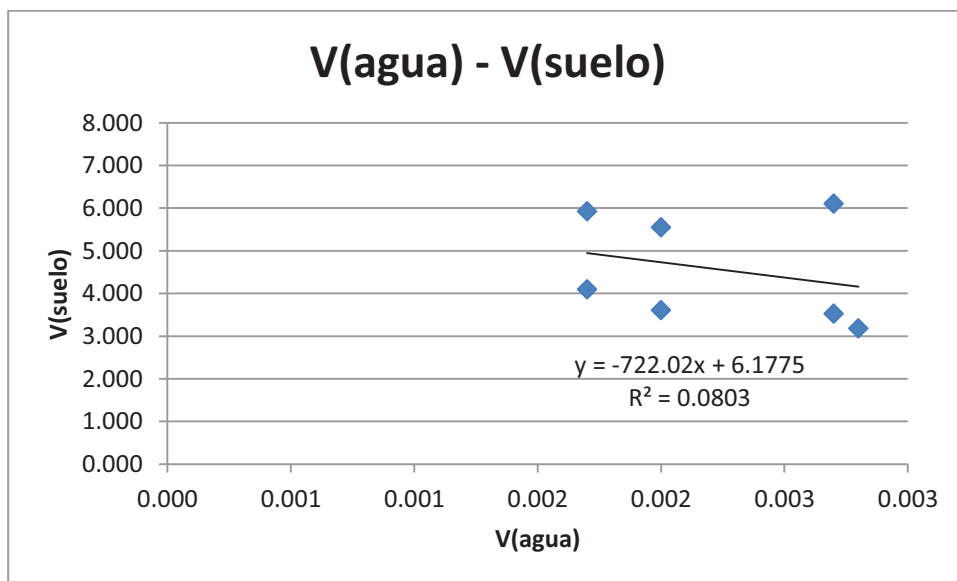


Figura 3.27: Concentraciones V en suelo vs V en agua

## CAPITULO IV

### MODELAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

#### 4.1 Introducción

La construcción de un modelo de flujo de agua subterránea y contaminante, se plantea según el diagrama de flujo Figura 4.1. El modelo se aplica al acuífero libre y al semiconfinado existentes en el subsuelo del área urbana de la Parroquia San Carlos.

Para la construcción del modelo, primero es necesario realizar la recopilación de datos de campo y laboratorio, lo que permitirá desarrollar un modelo conceptual de la realidad existente, respecto a la topografía, estratigrafía, hidrología, estado del nivel freático, o parámetros de conductividad del acuífero y condiciones de borde

Segundo, se define el dominio físico identificado por una malla donde se aplica el modelamiento. Este dominio representa la extensión superficial del área de estudio y se establecen las condiciones de borde (límites físicos), en este caso natural.

En este estudio los límites naturales de la parroquia San Carlos son al Norte el campo Sacha Sur, al sur una plataforma petrolera del pozo 45 B, al Este el estero Sapito y al Oeste el río Huamayacu. El área urbana se limita a doce manzanas: al Norte una iglesia y una escuela (Crnl. Emilio Suarez), hacia el sur se extiende el poblado en cuatro calles con un jardín de infantes y una academia artesanal (Integración Andina).

Tercero, se introducen las condiciones del acuífero, los datos de los niveles freáticos medidos en diferentes tiempos, los caudales del estero Sapito y del Río Huamayacu (condiciones de borde).

Se continua con la calibración del modelo, que en realidad es el “proceso de modificación de los parámetros de entrada del modelo hasta

que los resultados del mismo correspondan razonablemente a las condiciones reales del sitio. “La forma más común de evaluar cuantitativamente el grado de calibración de un modelo es graficar la distribución de niveles de agua calculadas versus la distribución de niveles de agua observadas usando los pozos de observación utilizados para el modelo (Schlumberger Water, 2009).

La calibración del modelo se realiza utilizando el programa PEST, que es una herramienta que usa un proceso iterativo de cálculo de modo que se logra una primera aproximación en el modelo de flujo de agua subterránea. Luego el programa modifica los parámetros de entrada en rangos aceptables para al final obtener un resultado coherente (donde coincidan de la mejor manera lo observado con lo calculado), principalmente en los valores de niveles de agua del acuífero. Aquí se debe tomar en cuenta un hecho real muy importante a pesar de que el modelo es uno, los niveles del acuífero son cambiantes luego se necesitaría un modelo que involucre esta condición.

Una vez calibrado el modelo de flujo de agua subterránea, se realiza la configuración para la simulación de transporte de metales pesados Ni, Cd, Pb, V para lo cual son necesarias las concentraciones de los contaminantes metálicos medidos en cada uno de los pozos de observación y una concentración inicial en el área donde se inició en el pasado la contaminación, en este caso el Estero Sapito. En esta parte del modelo son muy importantes los valores de  $K_d$  o constante de distribución.

Por último, se reporta la extensión de las plumas de contaminación en el acuífero no confinado. Vera también Anexo 4, Modelo Flujo agua y transporte Ni, Cd, Pb, V.

#### **4.1.1 Definición de los objetivos**

El objetivo general de este estudio es realizar un modelo flujo y transporte de los metales pesados Ni, Cd, Pb, V presentes en el acuífero superior ubicado en el subsuelo de la zona urbana de la Parroquia San

Carlos Provincia de Orellana, para ello se han identificado las características propias del subsuelo y de las aguas subterráneas. Los metales pesados disueltos en la pluma son producto de la contaminación del suelo producida por la filtración de agua de formación que fue vertida desde el campo Sacha Sur por el estero Sapito sin ningún tratamiento previo.

Los objetivos específicos son los siguientes:

Determinar en el campo las condiciones de borde del área de estudio.

Establecer la dirección de flujo de las aguas subterráneas de la zona urbana de San Carlos, usando el paquete computacional especializado.

Establecer la dirección del flujo de los metales pesados Ni, Cd, Pb y V para definir las plumas de contaminación.

Elaborar mapas de contaminación con metales pesados en el acuífero superior a Escala 1:2000

#### **4.1.2 Recopilación y obtención de datos**

En la secciones 2.1 y 2.2 de se recopilaron datos de trabajos en campo y el laboratorio.

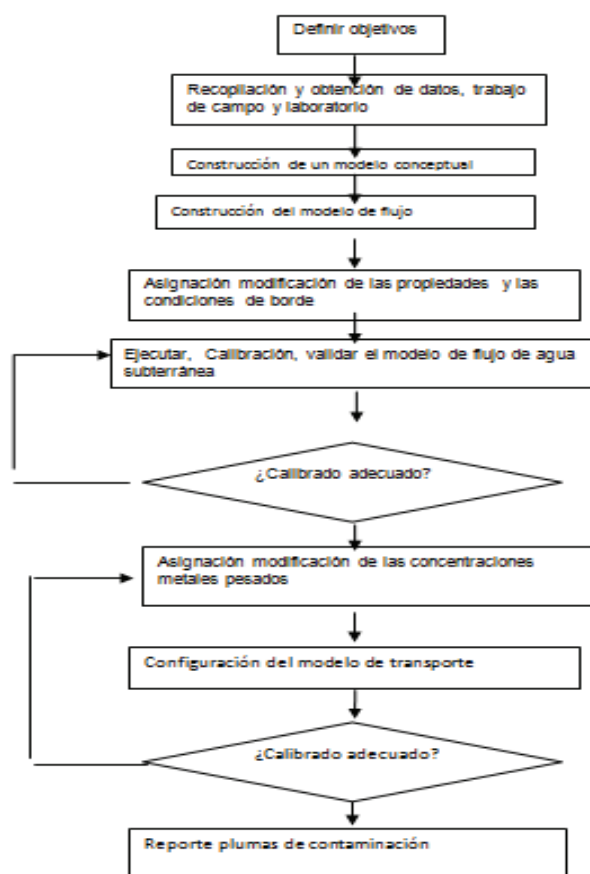
Los datos necesarios para aplicar el modelo son: topografía del terreno, estratigrafía y ubicación de los contactos entre las capas por cada sondeo que definen los espesores de la capa de limos y arcillas ubicadas en la parte superior y del acuífero confinado constituido por arenas finas en su mayor parte, profundidades del nivel freático medidas en diferentes fechas, permeabilidades de las capas medidas en los ensayos de bombeo, caudales en estero Sapito y río Huamayacu, medición de metales por espectrometría de absorción atómica y condiciones de borde.

#### **4.2 Desarrollo del Modelo conceptual**

Elaborar el modelo conceptual del sistema consiste en agrupar todos los datos de la topografía, estratigrafía , ubicación del nivel freático a diferentes

fechas, parámetros hidrológicos, simplificarlos de tal manera que los datos de campo completados con los de laboratorio reflejen la realidad existente en el campo y se pueda expresar en un modelo de la manera más precisa.

Realizada la caracterización del subsuelo en el área urbana de la Parroquia San Carlos y establecida la presencia de metales pesados según los resultados de los análisis químicos. En primera instancia, se concibe un modelo de flujo del agua subterránea en los dos estratos: Un estrato que aflora hacia la superficie constituido por limos arenosos y un estrato más profundo constituido por arenas finas. Cada uno de ellos tiene sus propias características y funcionan como medios transmisores de agua. En este estudio se presta especial atención al estrato de limos y arenas finas que conforman el acuífero superficial. El modelo de flujo establece las direcciones del agua subterránea.



**Figura 4.1: Diagrama de flujo de modelación. Etapas de construcción de modelo de flujo y transporte (Schlumberger, 2009)**

La nomenclatura y el lenguaje utilizado se han tomado del manual Modflow (User's manual, Visual MODFLOW Premium 4.3.)

Los datos tomados en el campo y que son necesarios para el modelo son:

Geografía

Estratigrafía

Hidrogeología del sitio

Nivel freático en régimen permanente

Propiedades hidráulicas del sistema

Este modelo conceptual será construido con el uso del programa VISUAL MODFLOW. Para esto se crea primero la carpeta "vmodnt" donde se aloja el sistema, se crea un directorio con el nombre de "PROY\_SAN CARLOS" donde se guardará el modelo, también se crea la carpeta de "ARCHIVOS" para guardar en diferentes archivos EXCEL datos de campo.

#### **4.2.1 Geografía**

La parroquia San Carlos está localizada en el oriente ecuatoriano, cantón Joya de los Sachas, provincia de Orellana.

Del levantamiento topográfico se puede observar que el terreno donde se asienta el área urbana es un valle limitado hacia el Oeste por el río Huamayacu y hacia el Nor-Este un estero denominado Sapito. La altura máxima en la zona urbana es de 271 msnm con un área aproximada de 20 Has.

Los datos del levantamiento topográfico (puntos topográficos) de la superficie del terreno para su posterior uso en el MODFLOW, se guardan en carpeta ARCHIVOS.

También deben agregarse aquí las coordenadas UTM (Este-Oeste, Norte Sur) y cota de la boca de los sondeos de investigación. Este archivo se guarda en la carpeta “ARCHIVOS” del directorio.

#### 4.2.2 Topografía

El mapa topográfico del área de estudio es guardado con el nombre “SAN CARLOS” con extensión .DXF y a su vez guardado en la carpeta de “ARCHIVOS” del escritorio donde se encuentra el modelo. Esto sirve para tener el mapa base del área urbana. Figura 4.2.

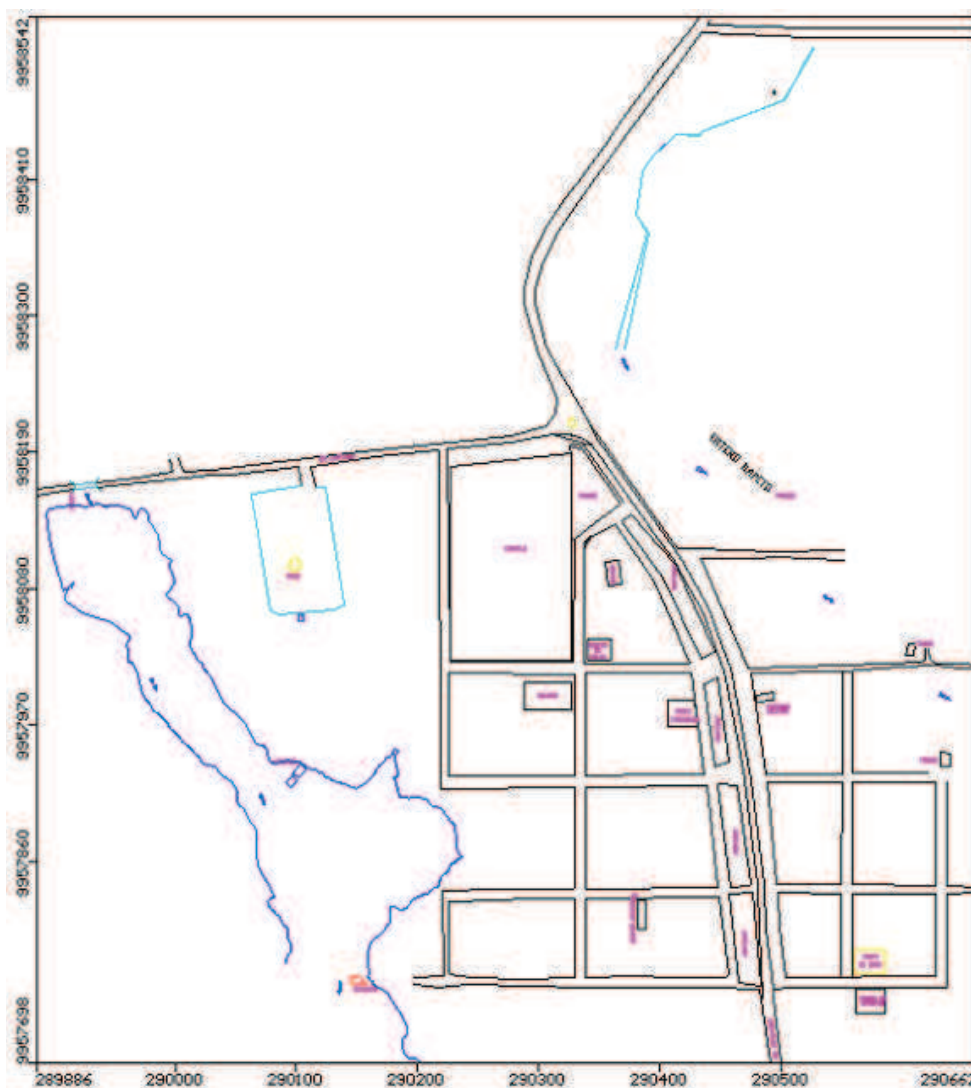


Figura 4.2: Mapa base. Área Urbana parroquia San Carlos

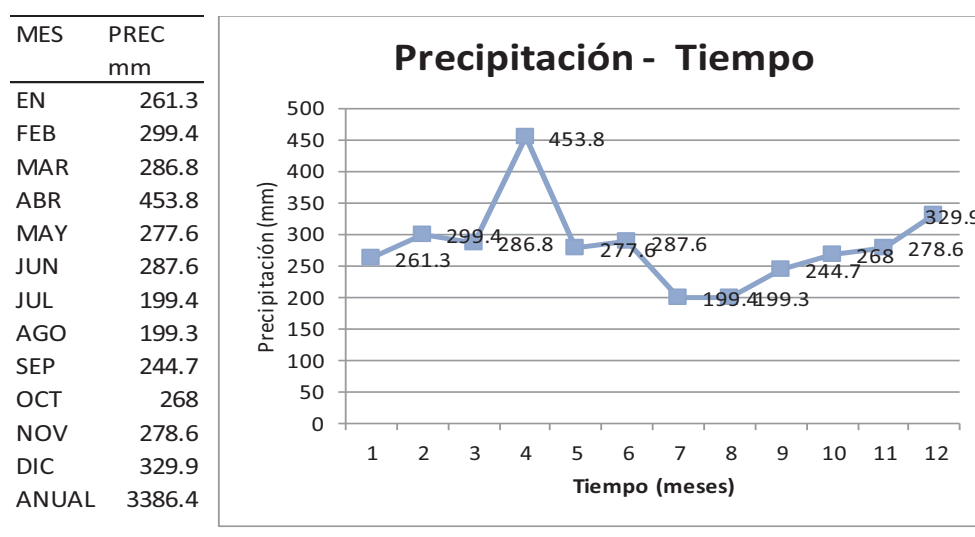
### 4.2.3 Hidrología del área de estudio

Los registros de hidrología para el área de San Carlos se han tomado, por su cercanía, de la estación meteorológica de la Estación Aeropuerto Coca.

El clima en el área de estudio es muy húmedo tropical, las precipitaciones en el cantón varían entre 2 650 a 3386 mm anuales y de mayo a noviembre las lluvias son más frecuentes, las temperaturas anuales promedio en el área son la mínima 18 °C, normal: 28 °C, máximo: 42°C (INAMHI, 2010). Los siguientes registros de precipitaciones y evaporación se han tomado de la Estación Aeropuerto Coca.

### 4.2.4 Precipitaciones

Se ha tomado el registro de precipitaciones según estación meteorológica “El Coca” para el 2008, la precipitación tiene dos épocas, la época más lluviosa va desde Diciembre hasta Junio y de Julio a Noviembre la menos lluviosa. Los valores más altos están en Abril (453.8 mm) y Diciembre (329.2 mm) y el período menos lluvioso es en Agosto (199.3 mm)



**Figura 4.3: Precipitaciones medias mensuales (mm). Fuente: Estación Aeropuerto Coca (2008).**

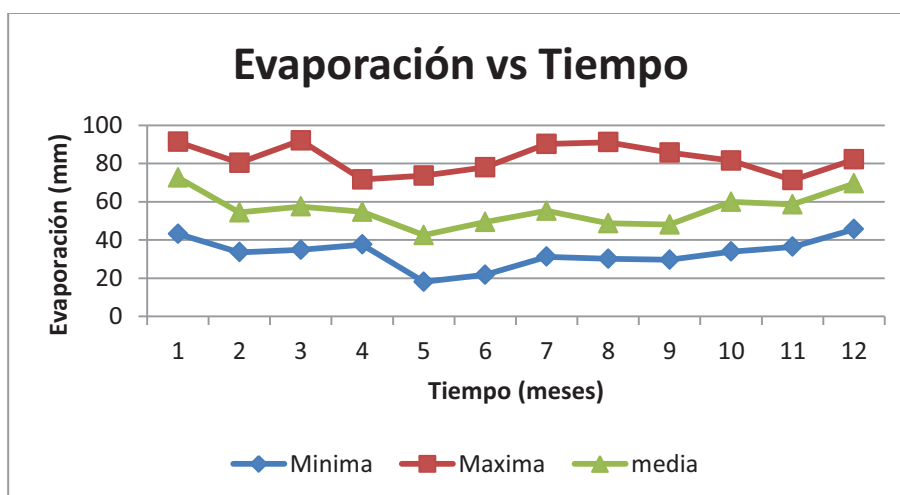


### 4.2.5 Evaporación

La evaporación se refiere a la emisión de vapor de agua a la atmósfera por una superficie libre de agua líquida pura, a una temperatura inferior al punto de ebullición y se anotan según datos de INEMIN en la Tabla 3.15.

**Tabla 4.1**  
**Evaporación. Fuente Estación Coca (2008)**

MES	Minima	Maxima	Media
EN	43.2	91.3	72.6
FEB	33.6	80.3	54.4
MAR	34.8	92	57.5
ABR	37.6	71.6	54.7
MAY	18.1	73.6	42.5
JUN	21.8	78	49.4
JUL	31.2	90.2	55.2
AGO	30.1	91.1	48.7
SEP	29.6	85.7	48
OCT	33.9	81.5	59.9
NOV	36.4	71.3	58.6
DIC	45.6	82.1	69.5
ANUAL	395.9	988.7	671



**Figura 4.4: Evaporación mensual (mm). Fuente: Estación Coca – INAMHI**

De la Figura 4.4 se deduce que la evaporación media es 56.0 mm, la mínima es de 18.1 mm en el mes de mayo y la máxima es de 92.0 mm en el

mes de marzo. Anualmente un acumulado mensual que varía entre 395.9 (mm) a 988.7 (mm)

#### 4.2.6 Recarga

Para el cálculo de la escorrentía se utilizan los datos de lluvia con un coeficiente de escorrentía  $C= 0.6$  (Monsalve Sáenz, 2009) y se presentan en la siguiente tabla

**Tabla 4.2**  
**Cálculo de recarga (filtración)**

MES	PREC mm/mes	Coefi. Escorrentía mm/mes	Escorrentia mm/mes	Evap mm/mes	Recarga mm/mes
EN	261.3	0.65	169.845	91.3	0.155
FEB	299.4	0.65	194.61	80.3	24.49
MAR	286.8	0.65	186.42	92	8.38
ABR	453.8	0.65	294.97	71.6	87.23
MAY	277.6	0.65	180.44	73.6	23.56
JUN	287.6	0.65	186.94	78	22.66
JUL	199.4	0.65	129.61	90.2	
AGO	199.3	0.65	129.545	91.1	
SEP	244.7	0.65	159.055	85.7	
OCT	268	0.65	174.2	81.5	12.3
NOV	278.6	0.65	181.09	71.3	26.21
DIC	329.9	0.65	214.435	82.1	33.365
Total	3386.4			988.7	238.35
Porcentaje (%)				29	7

El agua que ingresa en el suelo sin tomar en cuenta el porcentaje que se evapora o es absorbida por las plantas, se calcula mediante la fórmula mencionada en 1.1.1:  $\text{Recarga} = \text{Precipitación} - \text{Evaporación} - \text{Escorrentía}$ .

De la Tabla 4.2 se puede apreciar que, en un año, la infiltración para el acuífero o recarga por lluvias (238.4 mm) constituye un 7% de la precipitación y la evaporación (897.4 mm) constituye hasta el 29 % de la misma.

#### **4.2.7 Caudales de Río Huamayacu y Estero Sapito**

Los caudales se midieron en tres puntos del río y 3 puntos del estero, se utilizó la técnica del micromolinete, un resumen de los resultados de los ensayos de campo se describe en la sección 2.4.3.

El cauce del estero sapito a la altura del pueblo está a 264 msnm, y el cauce del río Huamayacu a 256 m. En realidad existe una diferencia de alturas de hasta 8 m, lo cual establece una condición natural de flujo desde el estero Sapito hasta el río Huamayacu además de ser un indicativo de la dirección del flujo de agua, desde el estero hasta una cota más baja o hacia el río.

#### **4.2.8 Estratigrafía del subsuelo**

Para definir la estratigrafía del subsuelo en el área urbana se realizaron pozos de observación mediante perforaciones. Pozos profundos (de hasta 20 m) denominados P2D, P5D, P6D, P7D, P8D, P9D, P12D, P18D, P19D, P20D, P21D, PD22D. Sondeos someros (de hasta 10 m) denominados P01, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09, P10, P11, P12.

A partir de los resultados de los sondeos, la estratigrafía subterránea primaria del sitio consiste en:

Un estrato superficial compuesta en su mayor parte por limos y arcillas saturados con un espesor que varía entre 5.5 m (P20D) a 8.5 m (P6D). Este es un estrato saturado por la constante filtración de agua lluvia (precipitación) y constituye el acuífero superior libre.

Un estrato de arena fina que tiene un espesor mayor a 20 m constituye un acuífero semiconfinado, con recarga de carácter regional, que abastece al pozo de agua subterránea de la junta parroquial en la actualidad.

Roca arenisca, que puede observarse en el río Huamayacu y constituye un basamento de roca arenisca de grano fino.

En cada uno de los pozos, (con sus respectivas columnas estratigráficas) se puede introducir las cotas a las que se encuentran los contactos entre los estratos de limos y arcillas con la arena y el fondo de la perforación. Además se introduce la identificación del pozo, las coordenadas UTM correspondientes a la ubicación Este y Norte y la cota de la boca de perforación del sondeo de exploración.

Las cotas que se anotan en las columnas Z1, Z2, Z3 (ver Tabla 4.3) son las alturas sobre el nivel del mar de: la boca de perforación del pozo en superficie, el contacto entre el estrato de limos y arcillas con el estrato de arenas finas y la cota en profundidad del fondo del sondeo y estos datos son las que va a leer el programa.

En el río Huamayacu se tiene un basamento de roca arenisca de grano fino. Desde el fondo del río hacia arriba se observan depósitos de suelos que han sido clasificados en las columnas estratigráficas.

**Tabla 4.3**

**Cotas de contacto entre estrato de limos y arcillas y basamento roca.**

POZO	ESTE	NORTE	BOCA POZO	LIMOS ARCILLAS	ARENAS
	X	Y	Z1	Z2	Z3
P 2 D	290040.19	9958128.83	270.50	259.00	210.50
P 5 D	290638.32	9957930.23	267.10	254.60	208.10
P 6 D	290492.90	9957920.86	270.50	256.00	210.75
P 7 D	290510.61	9958008.50	269.50	259.00	210.75
P 8 D	290497.47	9957861.84	270.60	255.60	210.60
P 9 D	290616.81	9957849.82	270.30	258.80	212.05
P 12 D	290556.58	9958011.08	268.50	255.50	208.50
P 18 D	290307.71	9958175.18	270.50	256.50	210.50
P 19 D	290248.22	9958053.36	270.40	256.90	210.40
P 20 D	290201.49	9958100.99	270.60	257.10	210.60
P 21 D	290116.57	9957943.42	262.50	250.50	202.50
P 22 D	290154.92	9957931.69	263.10	251.10	203.10
P 01	289974.63	9958163.01	263.50	258.00	223.50
P 03	290104.06	9958056.18	270.50	260.75	220.85
P 04	290273.93	9957913.89	271.50	263.00	223.65
P 05	290623.31	9957919.16	269.20	256.45	221.70
P 06	290433.29	9957901.92	270.50	256.00	222.93
P 07	290151.65	9958115.52	270.50	260.50	225.80
P 08	290543.25	9957846.88	270.50	257.50	222.96
P 09	290623.32	9957826.71	270.30	260.30	221.73
P 10	290573.93	9957737.22	270.80	259.55	230.80
P 11	290345.89	9957990.53	270.50	261.50	229.30
P 12	290558.48	9957997.74	267.90	255.15	218.20

#### 4.2.9 Pozo de junta de agua

El pozo de La Junta de Agua, tiene una profundidad de 32 m., pero el nivel del espejo de agua constante está a 12 m. por debajo de la boca del pozo. Con un caudal de salida de hasta 43.2 m<sup>3</sup>/día.

#### 4.2.10 Cotas del nivel de agua

En la Tabla 4.4 se anota un resumen de las cotas del nivel de agua medidas en diferentes fechas, coordenadas geográficas del pozo, nombre del pozo, cota de la boca del pozo, cota de la base del pozo (fondo de la excavación), tiempos transcurridos en días desde la creación del pozo hasta las fechas de medición del nivel freático (tiempo de observación), cotas de los niveles freáticos correspondientes a esos tiempos transcurridos. Estos se introducirán como datos en el modelo.

**Tabla 4.4**

#### **Niveles de agua a partir del 2009-30-10**

X	Y	WELL ID	TIEMPO OBS (DÍAS)	NF(CSNM)
289974.6	9958163.0	P01	164	263.5
290104.1	9958056.2	P03	160	260.85
290273.9	9957913.9	P04	162	263.65
290623.3	9957919.2	P05	158	261.7
290433.3	9957901.9	P06	159	262.93
290151.7	9958115.5	P07	162	265.8
290543.2	9957846.9	P08	158	262.96
290623.3	9957826.7	P09	158	261.73
290573.9	9957737.2	P10	158	265.8
290345.9	9957990.5	P11	118	263.65
290558.5	9957997.7	P12	118	258.2
290040.2	9958128.8	P2D	102	259.9
290638.3	9957930.2	P5D	84	260.4
290492.9	9957920.9	P6D	98	261.5
290510.6	9958008.5	P7D	79	261.62
290497.5	9957861.8	P8D	98	266.6
290616.8	9957849.8	P9D	98	262.3
290556.6	9958011.1	P12D	98	260.51
290307.7	9958175.2	P18D	67	265.23
290248.2	9958053.4	P19D	59	262.02
290201.5	9958101.0	P20D	58	262.02
290116.6	9957943.4	P21D	59	257.7
290154.9	9957931.7	P22D	59	257.66

#### 4.2.11 Propiedades hidráulicas de las capas.

Las propiedades hidráulicas del suelo empleadas en el modelo se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 4.5**  
**Propiedades hidráulicas del suelo**

Parámetro	Simbología	Capa limos y arcillas (Layer 1)	Capa arena de (Layer 2)
Conductividad	Kx (m/seg)	5.155738x10 <sup>-7</sup>	2.4893704x10 <sup>-6</sup>
Conductividad	Ky (m/seg)	2.36422x10 <sup>-5</sup>	4.72843x10 <sup>-5</sup>
Conductividad	Kz (m/seg)	1.0346231x10 <sup>-6</sup>	1.8062243x10 <sup>-5</sup>
Almacenamiento específico	Ss	2.22316x10 <sup>-6</sup>	2.76558x10 <sup>-5</sup>
Rendimiento específico	Sy	0.23	0.17
Porosidad efectiva	Eff por	0.23	0.17
Porosidad Total	Tot por	0.58	0.39

Todos los datos anteriores se guardan en un archivo de tal forma que se pueda importar al MODFLOW cuando así sea necesario.

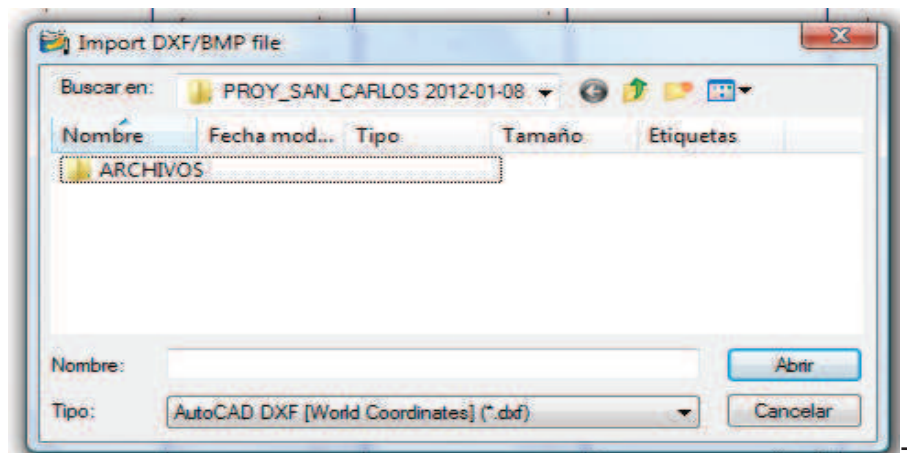
### 4.3 Primera parte. Construcción de modelo de flujo de agua subterránea

#### 4.3.1 Sección 1: Creación del modelo

El uso del programa MODFLOW se inicia con la creación de archivos de datos.

##### Paso 1.- Creación archivo de datos

Para comenzar se inicia VISUAL MODFLOW y se crea un archivo con un denominado ARCHIVOS:



**Figura 4.5: Creación de archivo de datos**

En la carpeta archivos se guarda la siguiente información en archivos Excel.

- Conductividad capa 1 (limos arcillas)
- Conductividad capa 2 (acuífero superior confinado)
- Coordenadas pozos y cotas de profundidad de contacto estratos
- Cotas nivel freático
- Datos de concentración contaminantes cada uno de los pozos
- Puntos de topografía

También es necesaria la creación de un archivo donde se encuentra un croquis de la superficie del pueblo que incluyen calles, edificios principales y ubicación de río Huamayacu y estero Sapito

- Mapa superficial del área de estudio (\*.vmf)

#### Paso 2: Ajustes para el flujo

En principio en la siguiente ventana aparecen por defecto parámetros para la simulación de flujo en esta es muy importante el tiempo de simulación de flujo para el estado estacionario. Cuando un sistema de flujo no varía con el tiempo se denomina régimen permanente

Steady State Simulation Time 18250 días = 50 años se escoge este periodo de tiempo debido a que la TEXACO inicio la exploración petrolera en Ecuador hace aproximadamente 50 años y es un número múltiplo de 10 que facilita el trabajo de cálculo teórico. Exactamente la exploración petrolera inició en Lago Agrio en 1969 .

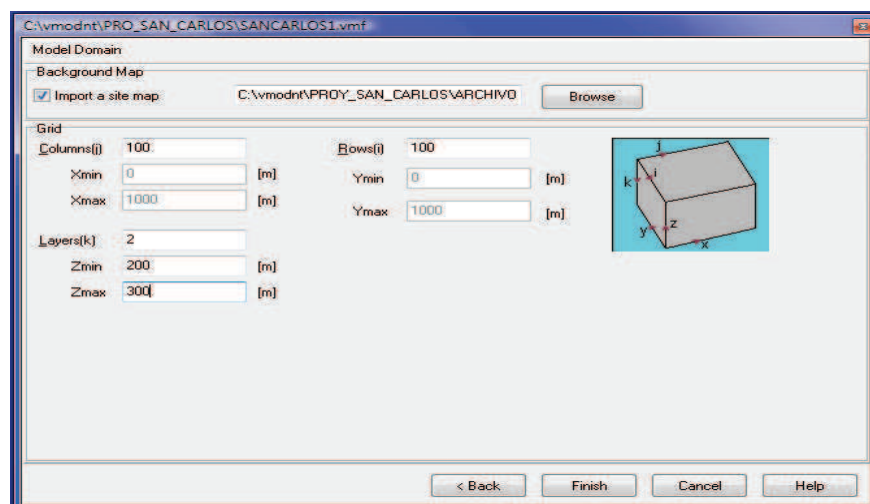
### Paso 3: Ajustes de transporte

En esta ventana aparecen por default valores de parámetros para la simulación de transporte. Se deja los valores por defecto ya que todos serán modificados más adelante al definir la denominada máquina de cálculo.

### Paso 4: Dominio del modelo

En este paso se crea un dominio del modelo y se definen un número de filas y columnas (100) y número de filas (100) para una malla de diferencias finitas. También se define el número de estratos 2. Capa 1 acuífero superior libre correspondiente al estrato de limos y arcillas y Capa 2 correspondiente a la arena o acuífero semiconfinado. Cada uno con características diferentes.

Además se importa un mapa de localización del área de estudio y se define la localización del área urbana de la parroquia de San Carlos.



**Figura 4.6: Dominio de modelo**



Columns (j) 100  
 Filas (i) 100  
 Layers (k) 2, se trabaja en este modelo con capa 1 acuífero superior limos y arcillas, capa 2 acuífero inferior arenas

Zmin: 200, sería la altura mínima del modelo sobre el nivel del mar

Zmax 300, sería la altura máxima del modelo sobre el nivel del mar

A continuación se selecciona la región y el área de trabajo para análisis del modelo, según el levantamiento topográfico se definen las siguientes coordenadas para localizar el área dominio del modelo:

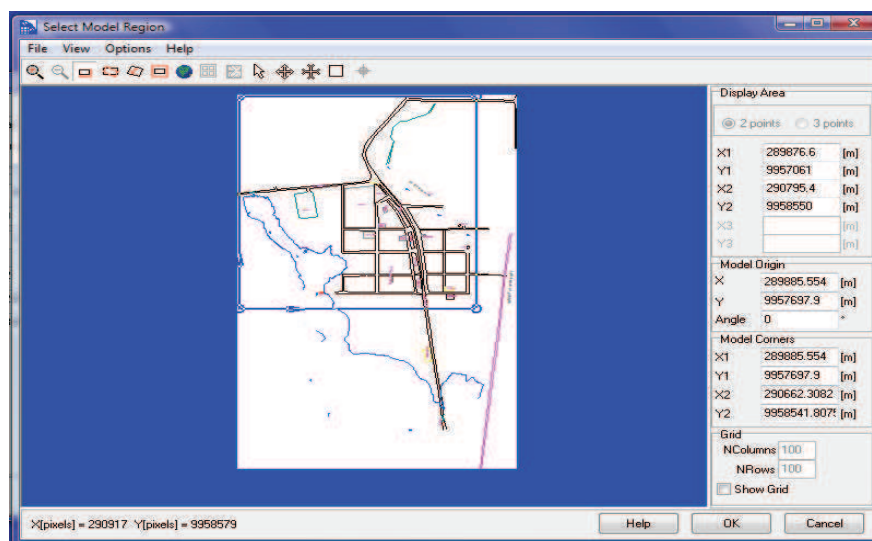
Display area:

X1 289876.6 (m)

Y1 9957061 (m)

X2 290795.4 (m)

X3 9958550 (m)



**Figura 4.7: Área dominio del modelo**

Model origen:

X 289885.554 (m)

Y 9957697.9 (m)

Model corners:

X1 289885.554 (m)

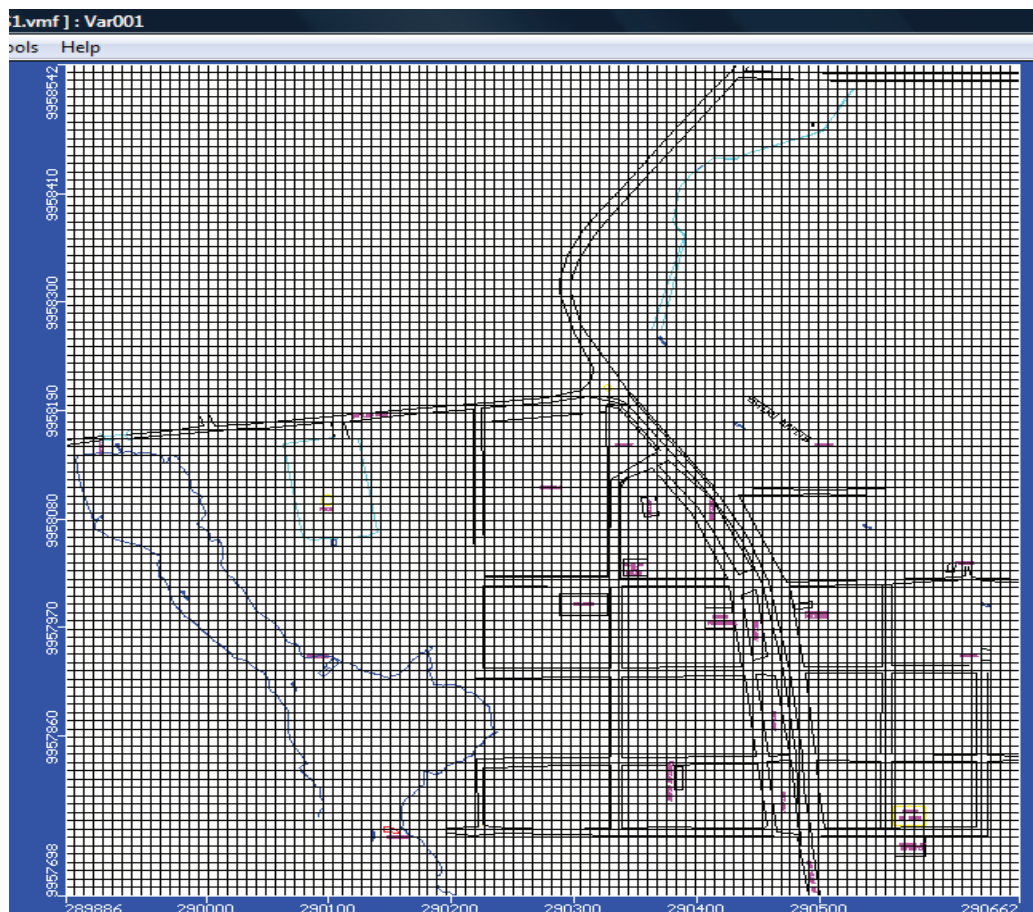
Y1 9957697.9 (m)

X2 290662.30 (m)

Y2 9958541.80 (m)

Luego de seleccionar la región del modelo se la guarda en un archivo SAN CARLOS.MAP

Luego la malla queda de la siguiente forma.



**Figura 4.8: Malla modelo**

### 4.3.2 Sección 2. Ajuste del modelo y de la malla

Paso 1. Topografía en superficie

Del ARCHIVO creado inicialmente se importa los datos de la topografía, con los respectivos puntos de lectura en el campo, coordenadas de ubicación, cotas, comentarios y observaciones.

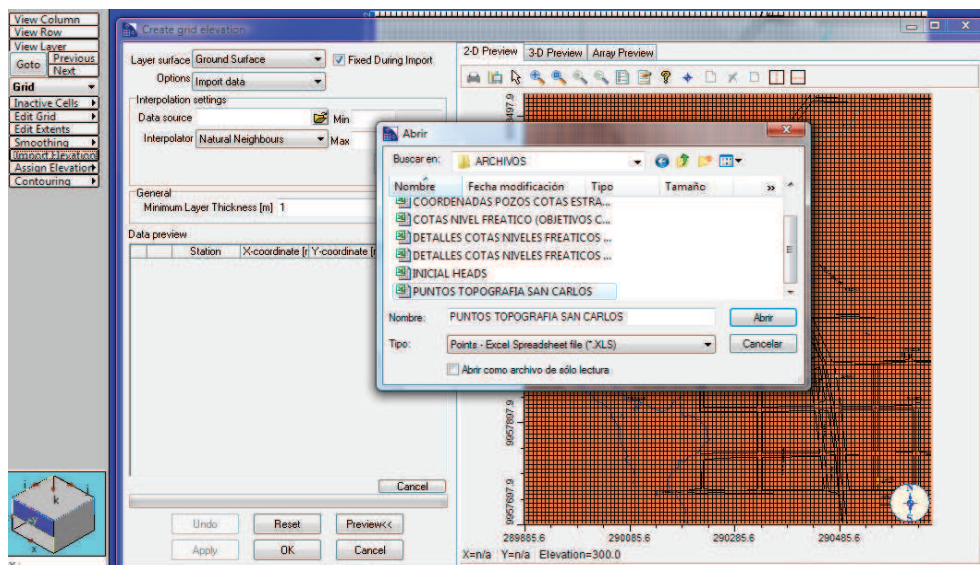


Figura 4.9: Importación archivo puntos topografía San Carlos

Entonces se crean las elevaciones de los puntos de malla

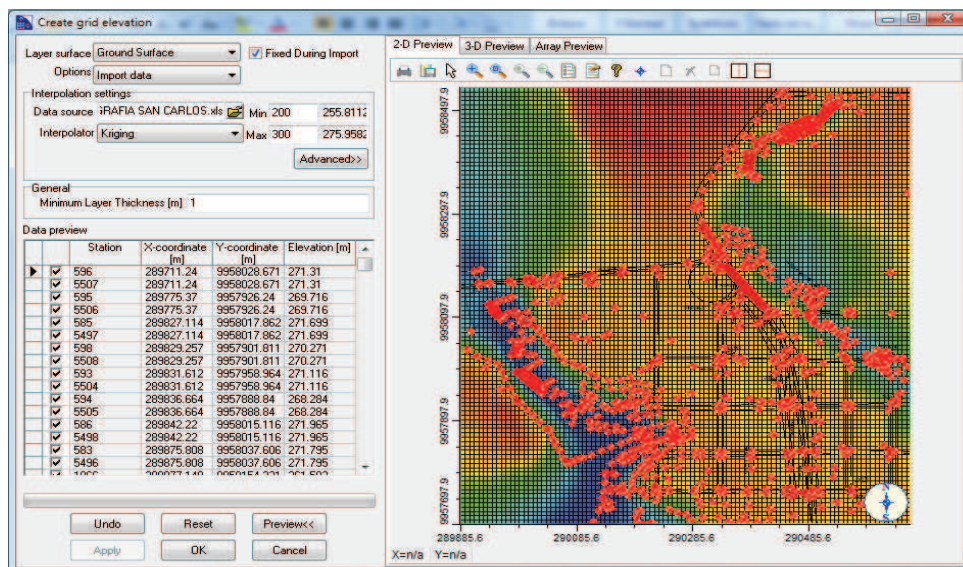
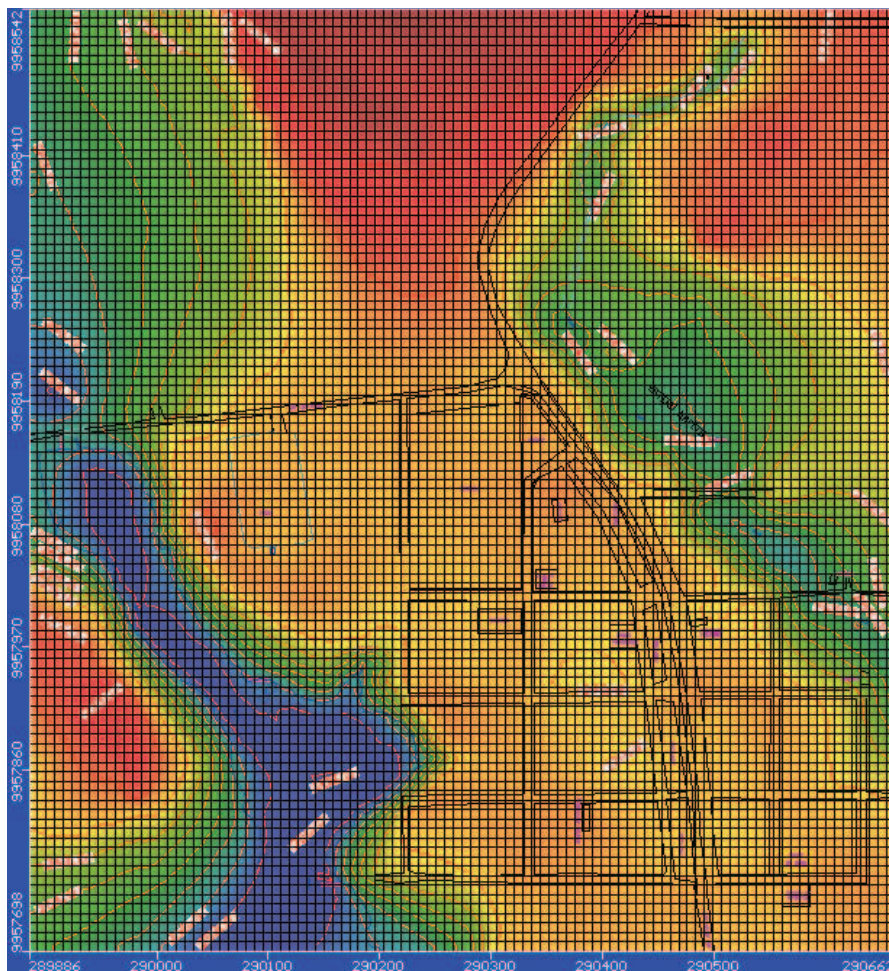


Figura 4.10: Puntos de elevaciones en la malla

El modelo en superficie tiene curvas de nivel y los puntos rojos corresponden a la ubicación de las estaciones al momento del levantamiento.

Luego las curvas de nivel en el área de estudio quedan ploteadas conjuntamente con la malla.



**Figura 4.11: Curvas de nivel**

#### **4.3.3 Sección 3. Adición de las coordenadas de los pozos de observación y cotas de ubicación de los estratos en cada pozo.**

Esta sección es importante porque se asigna al programa la ubicación de los pozos de exploración y se define en cada pozo las cotas

correspondientes al acuífero superior y al acuífero inferior es decir se puede distinguir las capas de que conforman la estratigrafía.

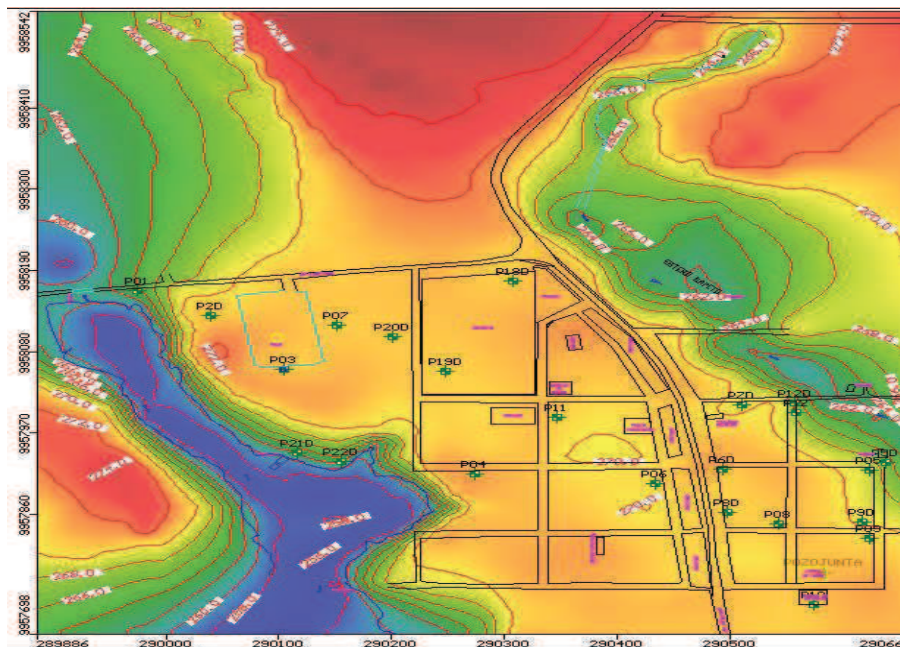


Figura 4.12: Pozos de observación

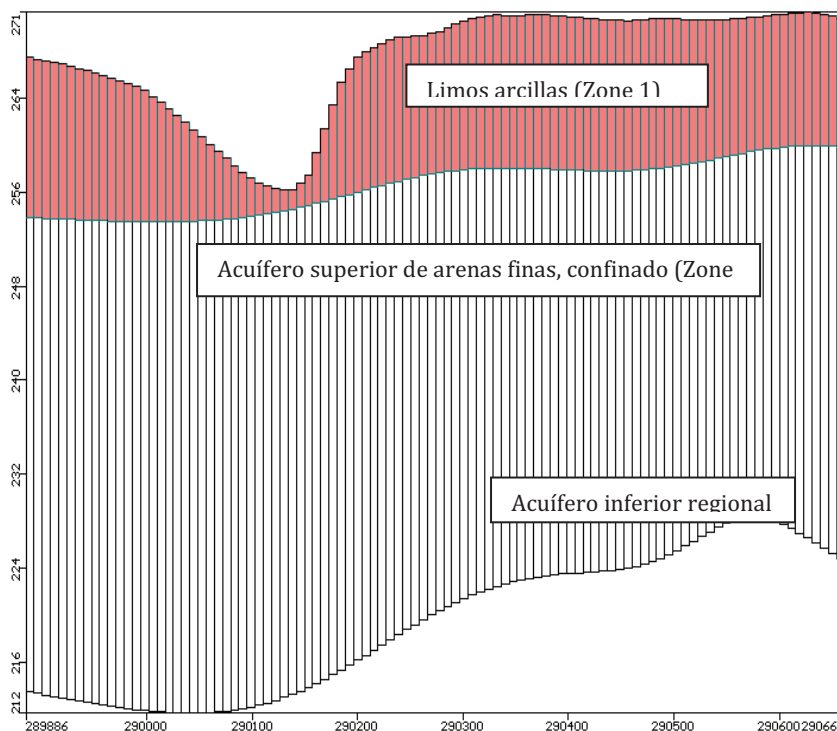


Figura 4.13: Acuífero superior e inferior

#### 4.3.4 Sección 4. Asignación de las propiedades hidráulicas del acuífero

En esta sección se introducen los datos resultados de los ensayos de bombeo como son: conductividad de ambas capas, almacenamiento, una cota inicial del nivel freático en los pozos de observación

#### 4.3.5 Conductividad

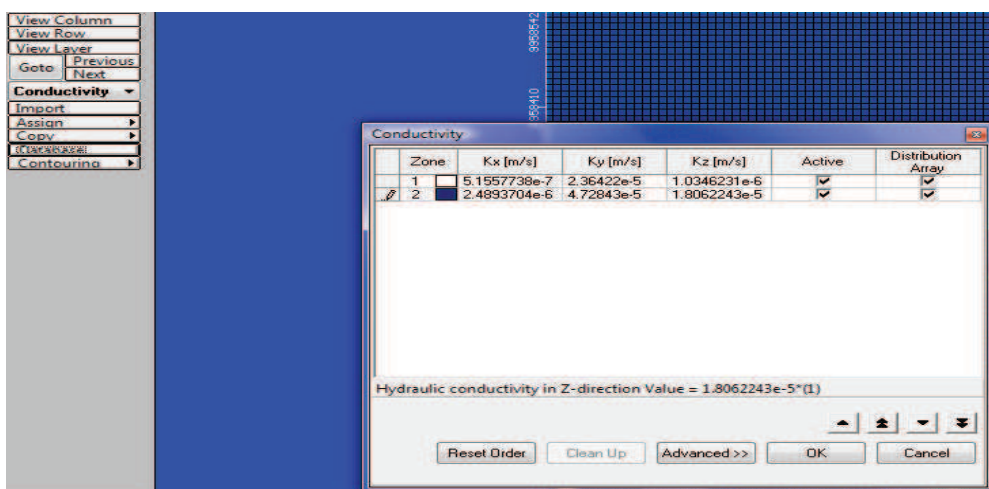


Figura 4.14: Conductividad

#### 4.3.6 Almacenamiento

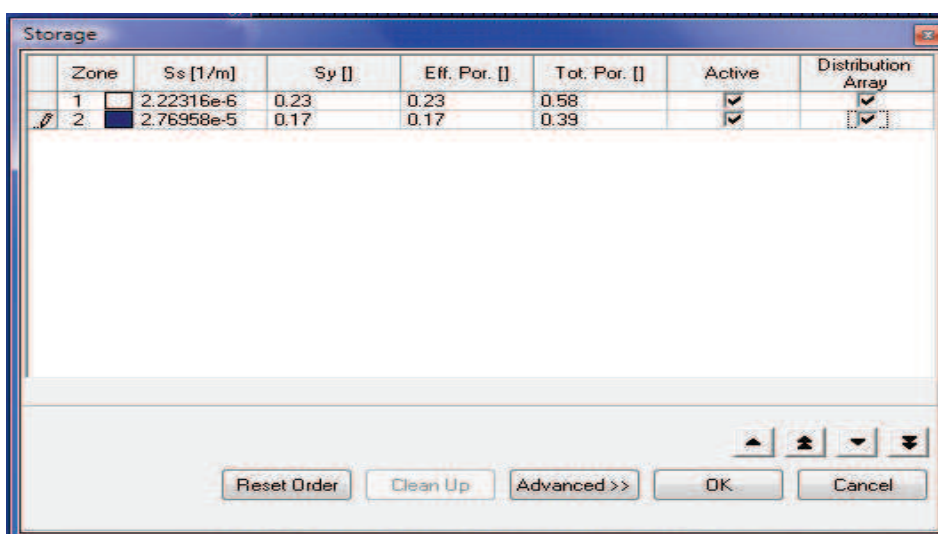


Figura 4.15: Almacenamiento

### 4.3.7 Objetivos de calibración para flujo de agua subterránea

Las cotas medidas del nivel freático en los pozos de observación constituyen los “objetivos de calibración” ya que posteriormente han de ser comparadas con las cotas calculadas. En este paso es necesario calcular un tiempo de observación que constituye el periodo en días desde que se tomó la primera medida del nivel del agua (screen elevation (m)) hasta la última medida (head (m)).

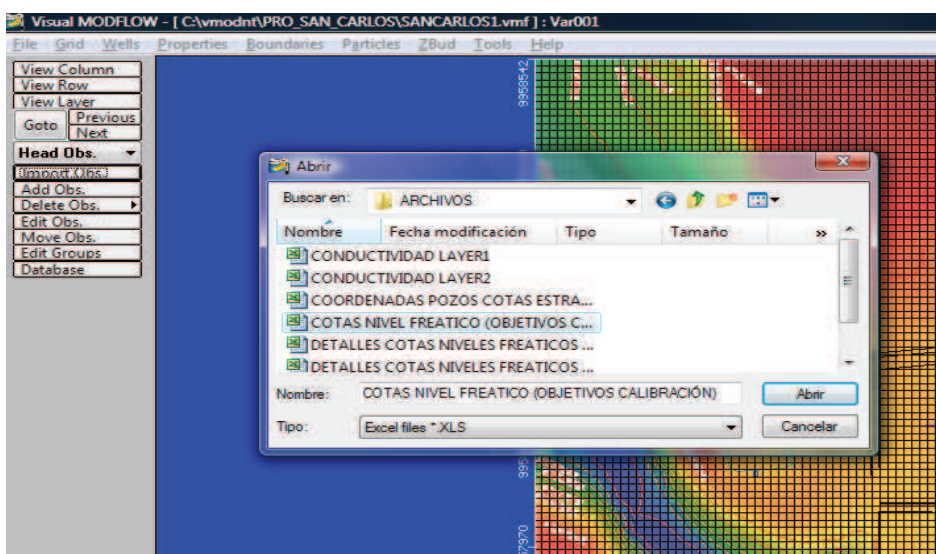


Figura 4.16: Importación cotas nivel freático

Well Name	X co-ordinate [m]	Y co-ordinate [m]	Screen ID	Screen Elevation [m]	Observation Time [day]	Head [m]
P01	289974.628	9958163.01	P01	253.5	164	253.5
P03	290104.058	9958056.17	P03	260.5	160	260.85
P04	290273.933	9957913.88	P04	261.5	162	263.65
P05	290623.308	9957919.15	P05	259.2	158	261.7
P06	290433.289	9957901.92	P06	260.5	160	262.93
P07	290151.654	9958115.52	P07	260.5	162	265.8
P08	290543.245	9957848.88	P08	260.5	158	262.96
P09	290623.318	9957826.70	P09	260.3	158	261.73
P10	290573.927	9957737.22	P10	260.8	158	265.8
P11	290345.893	9957990.53	P11	260.5	118	263.65
P12	290558.484	9957997.74	P12	257.9	118	258.2
P12D	290556.578	9958011.08	P12D	247.5	98	260.51
P18D	290307.705	9958175.17	P18D	250.5	67	265.23
P19D	290248.219	9958053.35	P19D	250.4	59	262.02
P20D	290201.490	9958100.98	P20D	250.6	58	262.02
P21D	290116.571	9957943.42	P21D	242.5	59	257.7
P22D	290154.924	9957931.68	P22D	243.1	59	257.66
P2D	290040.187	9958128.83	P2D	250.5	161	259.9
P6D	290638.317	9957930.22	P6D	247.1	84	260.4
P6D	290492.902	9957920.85	P6D	250.5	98	261.5
P7D	290510.612	9958008.49	P7D	249.5	79	261.62
P8D	290497.465	9957861.83	P8D	250.6	98	266.6
P9D	290616.813	9957849.82	P9D	251.4	98	262.3

Figura 4.17: Cotas de nivel freático en pozos de observación

#### 4.3.8 Datos pozo de bombeo de la junta parroquial.

Debido a la presencia de un pozo de bombeo (pumb well) para agua subterránea al costado sur del pueblo desde el año 2005 las condiciones de flujo del agua tanto del acuífero superior como del inferior han variado por la presencia del pozo con una rata de explotación de 43.2 m<sup>3</sup>/día. El análisis de las condiciones de las plumas de contaminación se realiza considerando el pozo de agua subterránea desactivado.

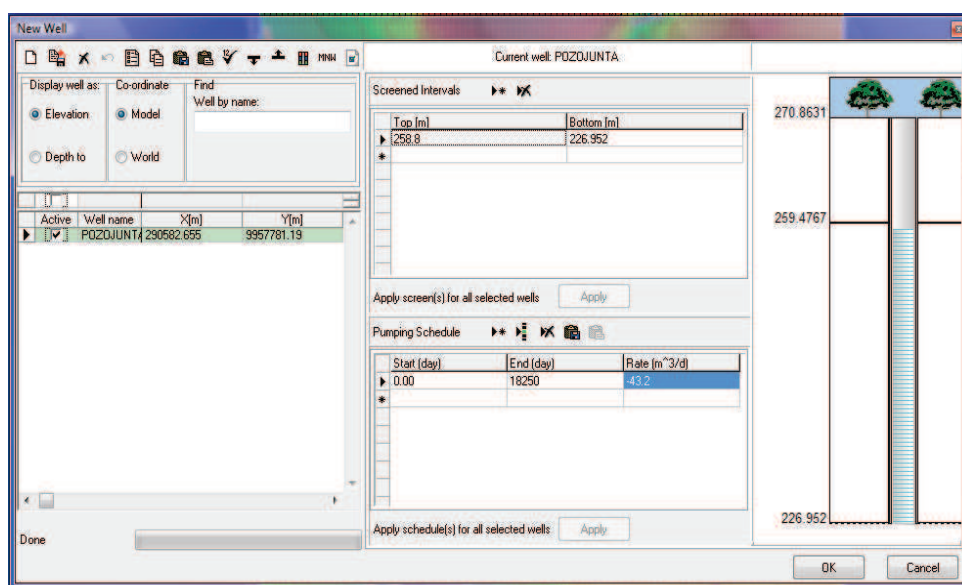


Figura 4.18: Datos “pozo bombeo” Junta Parroquial

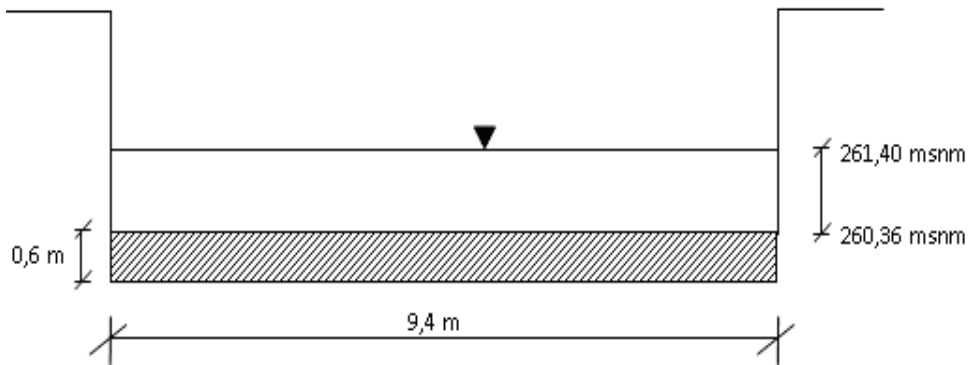
#### 4.3.9 Sección 5. Asignación de las condiciones de borde.

Se asignan las condiciones de borde para el Rio Huamayacu y para el estero Sapito para ello se ha determinado una sección típica en los sitios donde se determinó los aforos (caudales).

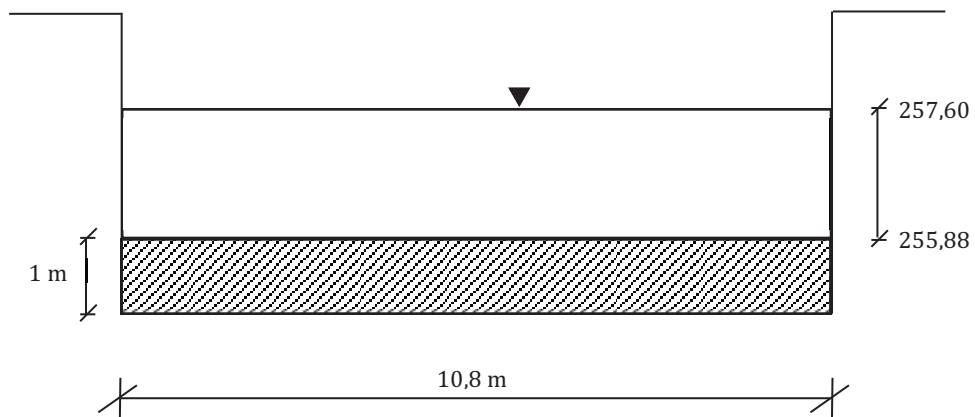


Condiciones de borde Río Huamayacu  
 Punto de aforo No.1 (puente vía a Río napo)

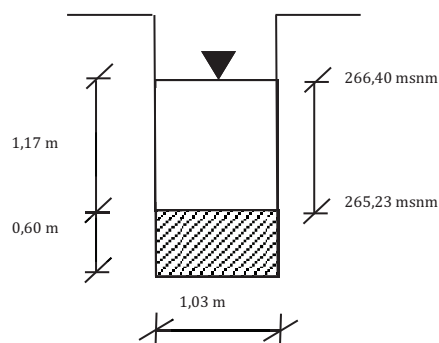
**AGUAS ARRIBA—RÍO GUAMAYACU**



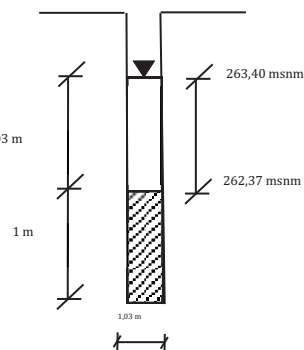
**AGUAS ABAJO—RÍO HUAMAYACU**



**AGUAS ARRIBA—ESTERO SAPITO**



**AGUAS ABAJO—ESTERO SAPITO**



**Figura 4.19: Condiciones de frontera para Río Huamayacu y Estero Sapito**

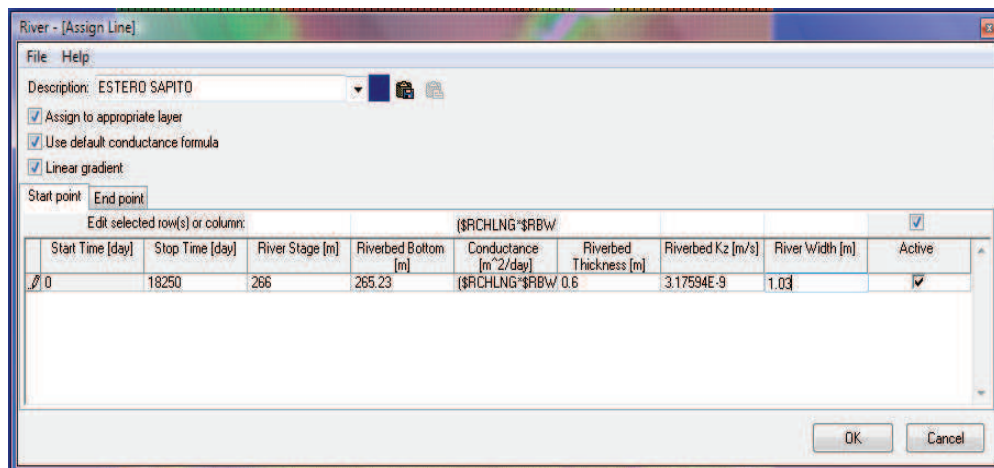
Las condiciones de borde medidas in situ Figura 4.19 se ingresan al programa de la siguiente forma

Start Time [day]	Stop Time [day]	River Stage [m]	Riverbed Bottom [m]	Conductance [m <sup>2</sup> /day]	Riverbed Thickness [m]	Riverbed Kz [m/s]	River Width [m]	Active
0	18250	261	260.36	(\$RCHLNG*\$RBY)	0.4	3.17594E-9	9.4	<input checked="" type="checkbox"/>

**Figura 4.20: Río Huamayacu. Condiciones de borde aguas arriba**  
Punto de aforo No. 2 (Salida de alcantarilla)

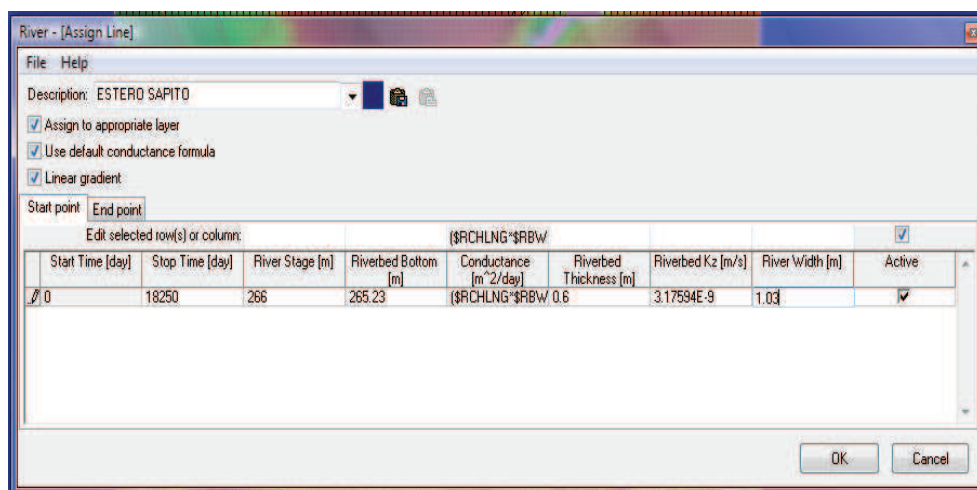
Start Time [day]	Stop Time [day]	River Stage [m]	Riverbed Bottom [m]	Conductance [m <sup>2</sup> /day]	Riverbed Thickness [m]	Riverbed Kz [m/s]	River Width [m]	Active
0	18250	257	255.88	(\$RCHLNG*\$RBY)	0.4	3.17594E-9	10.8	<input checked="" type="checkbox"/>

**Figura 4.21: Río Huamayacu. Condiciones de borde aguas abajo**  
Condiciones de borde estero Sapito  
Punto de aforo No 4 (Sitio alcantarilla salida del campo Sacha Sur)



**Figura 4.22: Estero Sapito condiciones de borde aguas arriba**

Punto de aforo No. 5 (diagonal a escuela Crnl. Emilio Suarez)



**Figura 4.23: Estero Sapito condiciones de borde aguas abajo**

#### 4.3.10 Sección 6. Calibración del modelo

La calibración del modelo, luego un largo desarrollo, es sin duda la parte más crítica debido a que los resultados de la misma definirán la validez del modelo y por lo tanto su nivel de confianza.

En este trabajo la confiabilidad del modelo se evalúa usando los siguientes criterios: Correlación entre resultados de los niveles observados versus los calculados e histograma de residuales.

Gráfica de datos calculados vs observados.

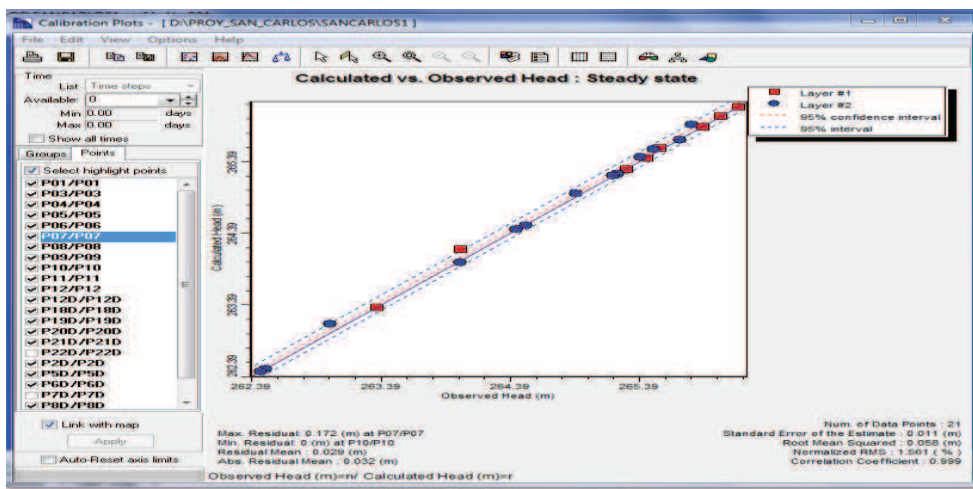


Figura 4.24: RMS normalizado = 1.561 %

Histograma de distribución de residuales

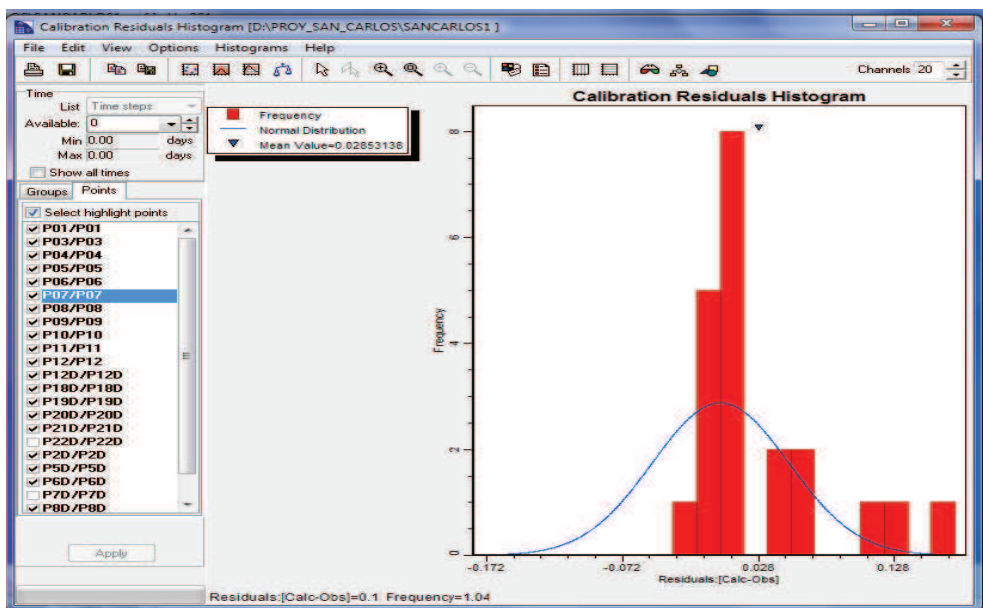


Figura 4.25: Histograma calibración de residuales

El número de pozos de observación es de 21, se toma en cuenta el Pozo P01 y se admite un nivel del agua semejante a la cota del río Huamayacu para modelar el flujo en esa área, los pozos P20, P21, ubicados cerca al río y en la propiedad del Sr. Tipán también se consideran a pesar de estar estos fuera del área urbana por la misma razón que el anterior.

La medias residual definida como:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

Donde  $R_i$  es el residual  $R_i = X_{\text{calculado}} - X_{\text{observado}}$

$R_i = -2.508$  (m), este valor permite calcular la media residual absoluta que se considera el absoluto residual.

$$|R| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i|$$

$|R|$  tiene un valor de 5.426 (m)

Visu MODFLOW también calcula el error estándar de la estimación (SEE) y el promedio de la raíz de los cuadrados de los residuales (Root Mean Squared Residual – RMS):

$$SEE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - R)^2}$$

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^n R_i^2}$$

Los resultados son para: SEE = 0.011 (m), RMS = 0.058 (m). Con estos valores se calcula un RMS Normalizado según la siguiente fórmula:

$$RMS_{\text{Normalizado}} = \frac{RMS}{(X_{\text{observado}})_{\text{maximo}} - (X_{\text{observado}})_{\text{mínimo}}}$$

$RMS_{\text{Normalizado}} = 1.56$  % para flujo de agua subterránea bajo el área urbana de San Carlos. Ver Figura 4.24

En general si el valor de RMS Normalizado tiene un valor por debajo del 10 % indica una calibración aceptable, considerándose una calibración buena por debajo del 5% (Fernández Torroba, 2004)

El histograma de los residuales permite comparar en forma cualitativa la distribución de residuales obtenida a una distribución de residuales normal. Idealmente la distribución de residuales de muchos pozos sería similar a la curva de distribución de student (Fernández Torroba, 2004). La distribución se ajusta a la normal excepto para el P07 con un valor máximo residual = 0.172.

El modelo de flujo de agua subterránea calibrado con las equipotenciales y velocidades de flujo se muestra en la Figura 4.26, así también se muestra un corte de en la mitad del pueblo hacia el río Huamayacu Figura 4.27 y una gráfica tridimensional donde puede apreciar la localización del nivel freático bajo el pueblo, Figura 4.28. Las líneas verticales en color verde corresponden a los sondeos de exploración.

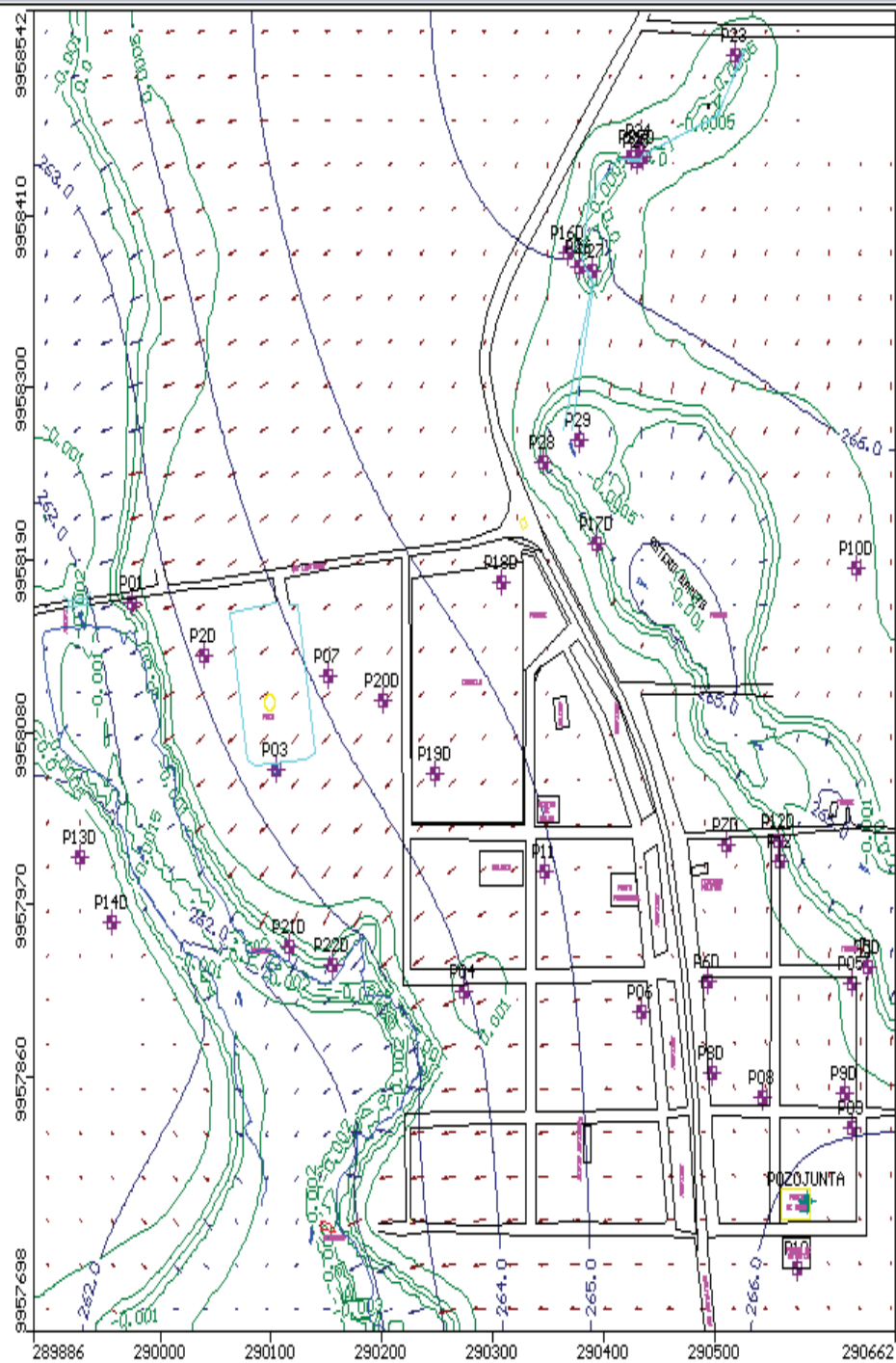


Figura 4.26: Equipotenciales y direcciones de flujo agua subterránea

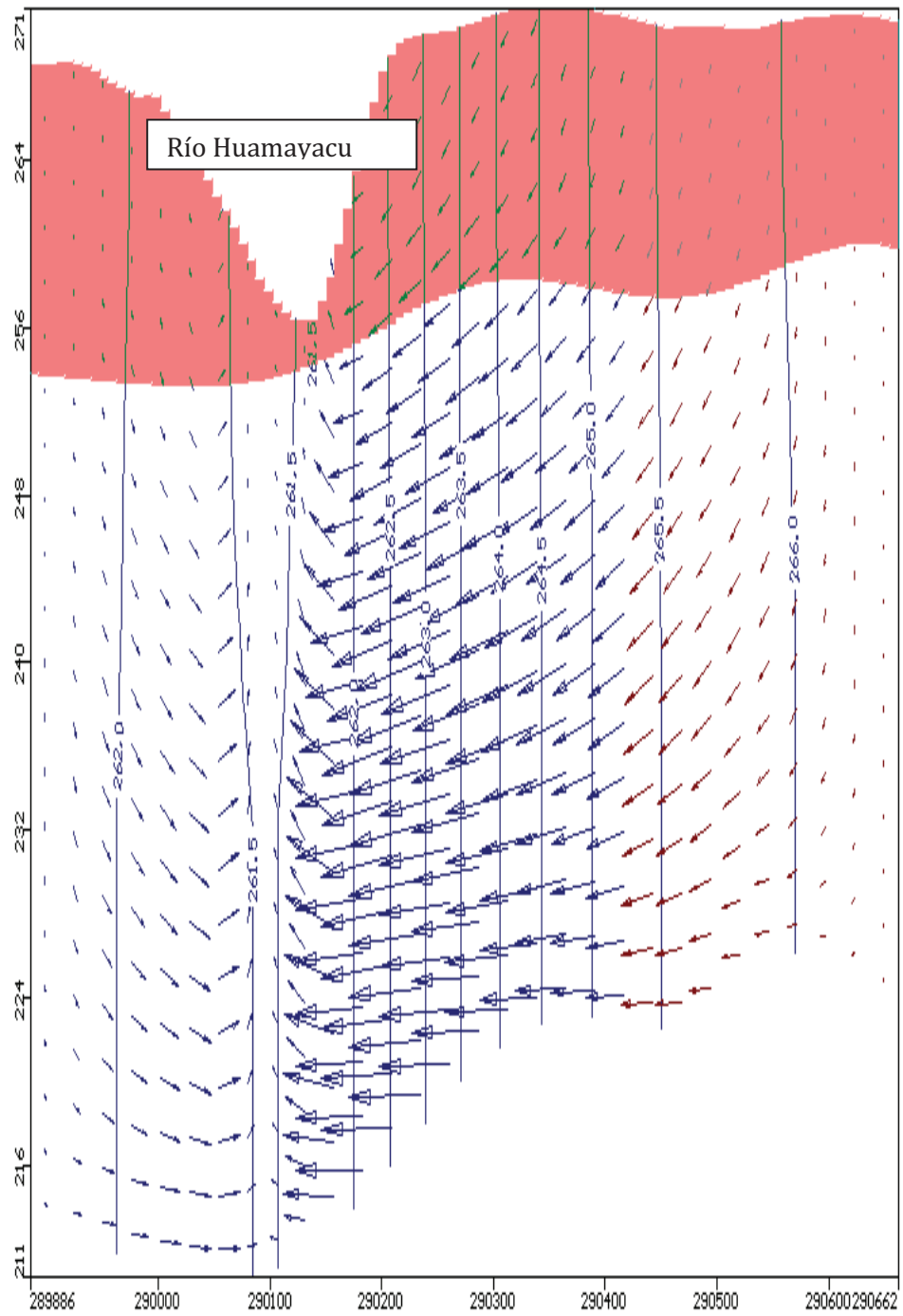
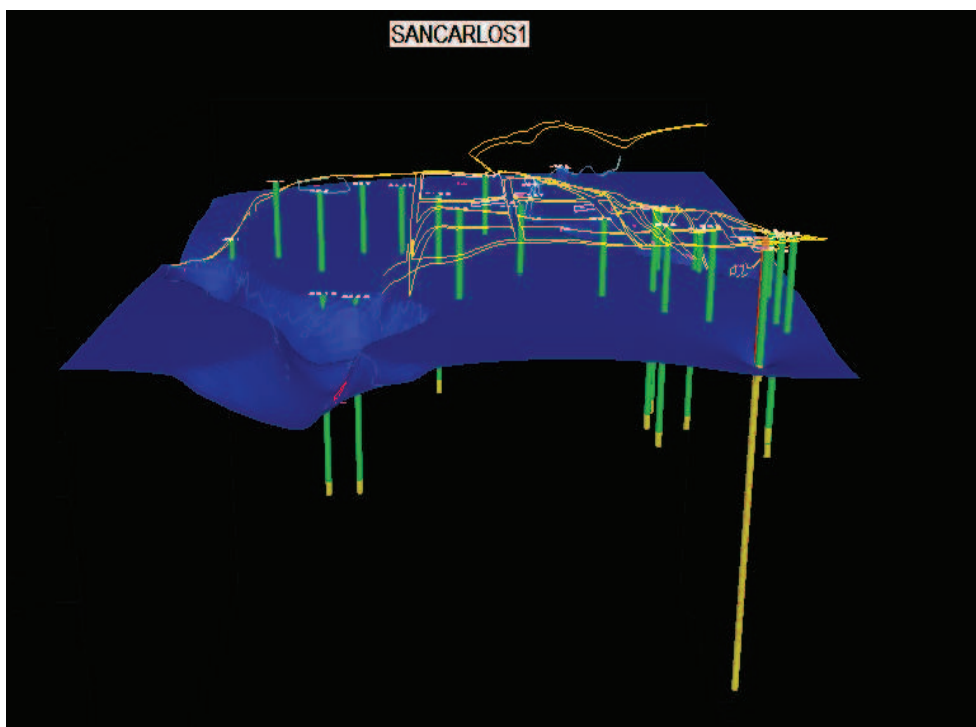


Figura 4.27: Dirección Del flujo de agua subterránea





NIVEL FREÁTICO - REGIMEN CONSTANTE

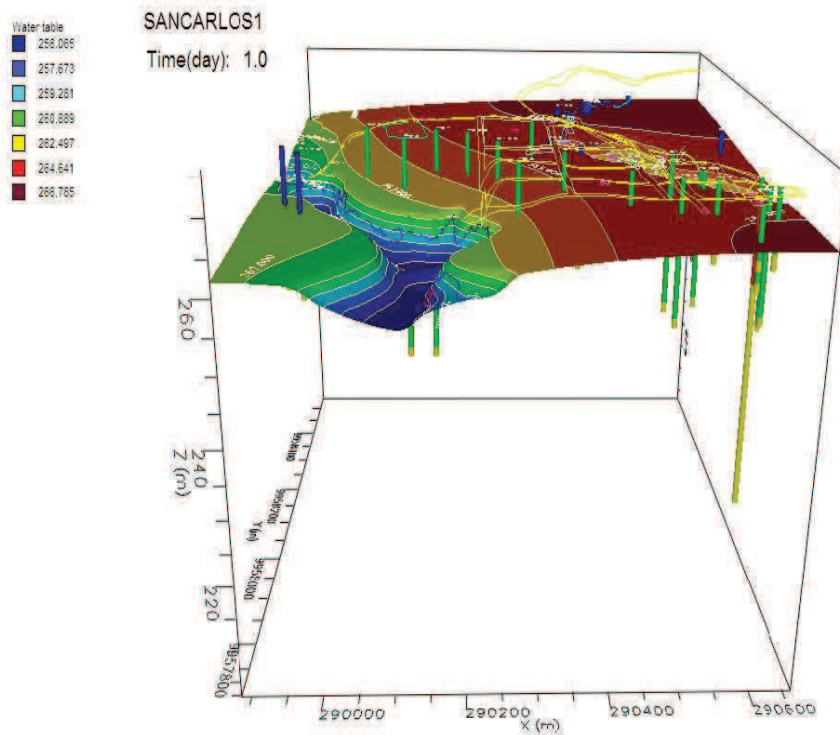


Figura 4.28: Vista tridimensional nivel freático

#### **4.4 Segunda parte.- Modelo de transporte de contaminantes**

Luego de la construcción del modelo de flujo para el agua subterránea, se procedió a la construcción del modelo de contaminantes que representaría a la condición respecto a la variación en el espacio y el tiempo de la concentración de contaminantes: Níquel (Ni), Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Vanadio (V) en el acuífero libre y en el semiconfinado bajo del área urbana de San Carlos.

##### **4.4.1 Parámetros de los contaminantes transportados.**

La función de los parámetros es facilitar el método de cálculo que incluye el transporte de los contaminantes con flujo de las aguas subterráneas en los acuíferos. Para este caso se modela por separado los cuatro contaminantes.

El modelo parte del principio muy simple: que los contaminantes que salieron con flujo superficial de la Estación Sacha Sur, fluyeron, se acumularon y alcanzaron una concentración inicial en el Estero Sapito. Luego por un período de 50 años = 18250 días, se transportaron por debajo del pueblo hasta terminar formando plumas de contaminación para ello se involucra en primera instancia el modelamiento del flujo de agua subterránea y en una segunda, la construcción de un modelo de flujo para los contaminantes.

En Capítulo 3 se anotaron los resultados de concentraciones constantes en el suelo en la época actual y se resumen en la Tabla 4.6. Estos valores de concentración se introducen como parte del modelo como concentración de contaminantes en cada uno de los pozos de observación.

**Tabla 4.6**  
**Concentraciones en el suelo**

ID Muestra	Cadmio	Níquel	Plomo	Vanadio
	Concentración (mg/L)	Concentración (mg/L)	Concentración (mg/L)	Concentración (mg/L)
P -2D	0.007	2.364	0.794	5.549
P – 03	0.007	0.173	0.717	7.18
P – 04	0.009	0.004	0.568	6.101
P – 05	0.008	-0.126	0.774	5.921
P -5D	0.008	0.095	0.597	4.099
P -06	0.012	-0.007	0.495	3.277
P- 6D	0.012	0.133	0.622	2.424
P – 07	0.009	0.175	0.624	3.313
P -7D	0.012	0.614	0.649	3.178
P -08	0.012	0.04	0.666	4.495
P -8D	0.014	0.011	0.56	3.014
P – 09	0.012	-0.041	0.567	3.372
P - 9D	0.011	-0.057	0.74	3.524
P – 10	0.011	-0.058	0.583	3.05
P -11	0.011	0.049	0.68	4.854
P – 12	0.009	-0.108	0.73	5.514
P - 12D	0.008	-0.102	0.694	5.599
P - 18D	0.01	0.053	0.859	3.607
P-19D	0.009	0.138	0.718	5.446
P-20D	0.008	-0.142	0.7	5.531

#### 4.4.2 Propiedades de las especies contaminantes

La concentración de los metales pesados inicial se da en un foco de contaminación como es el Estero Sapito. También se introduce el coeficiente de distribución ( $K_d$ ) para cada uno de los metales pesados la concentración inicial se obtiene de estudios anteriores. Mientras que los valores de  $K_d$  se calculan en este trabajo en función del pH del suelo.

#### 4.4.3 Coeficientes distribución

Para calcular los coeficientes de distribución se utiliza las fórmulas de EPA (EPA USA, 2003 Abril), sin embargo para el Vanadio (Allison & Allison, July 2005) se toma un valor referencial

**Tabla 4.7**

#### Coeficientes de distribución en función de pH

Metal	Fórmula EPA	pH	Kd
Cd	$Kd = 10^{0.397 \cdot pH - 0.943}$	5.87	24.4
Ni	$Kd = 10^{0.332 \cdot pH - 0.471}$	5.87	30.0
Pb	$Kd = 10^{0.0786 \cdot pH + 1.55}$	5.87	102.7
V	EPA	5.87	1000

#### 4.4.4 Condiciones de borde. Concentración constante

Las condiciones de contorno (concentración constante) son asumidas para el área de contaminación en el Estero Sapito (histórico).

**Tabla 4.8**

#### Condiciones de borde en el Estero Sapito

Metal	Concentración constante (mg/L)
<b>Cd</b>	0.38
<b>Ni</b>	4.81
<b>Pb</b>	16
<b>V</b>	2.42

#### 4.4.5 Plumas de contaminación

Las plumas o mapas de contaminación son representaciones de la distribución de los metales pesados obtenidos de la investigación del agua subterránea en el sitio y de lo que sucede con el acuífero (Ayer & Palmer, 2006) a lo largo del tiempo.

Las plumas se reportan en el subsuelo de San Carlos y han sido determinadas mediante un modelo de flujo de metales pesados en el que según los tiempos de control del modelo se determinan las concentraciones y la posición de la pluma de contaminación en cada uno de estos tiempos

A continuación se presentan las plumas de contaminación de los metales Níquel, Cadmio, Plomo y Vanadio versus tiempo hasta alcanzar 18250 días equivalente a 50 años.

**Tabla 4.9 Tiempos control modelo**

<b>Tiempos de control</b>	
Días	Años
365	1
1825	5
3650	10
9125	25
18250	50

Se ha tomado un tiempo de 50 años ya que la explotación petrolera inició en 1965 y los flujos de contaminantes desde la estación Sacha Sur por el Estero Sapito se abrían dado en este período.

#### **4.5 Tercera parte: Visualización de resultados, Plumbras de contaminación.**

##### **4.5.1 Pluma Contaminación del Cadmio en 3D, tridimensional.**

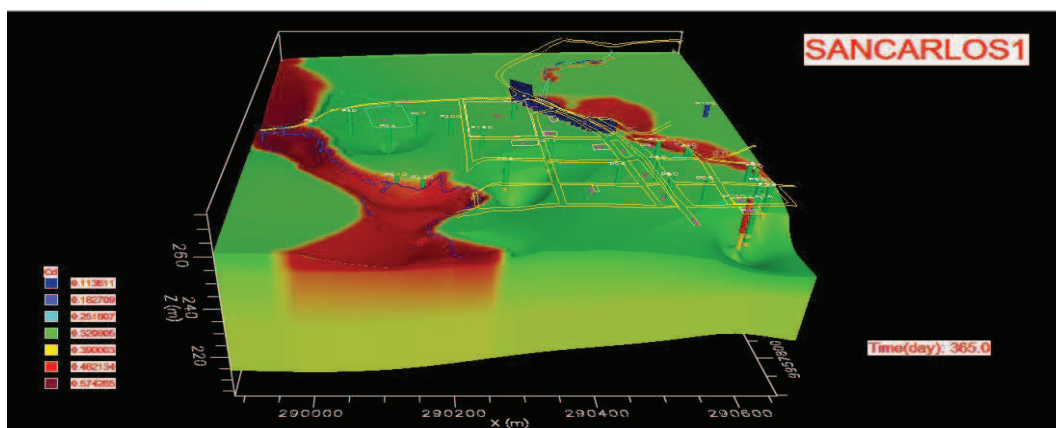


Figura 4.29. Cadmio 365 días (1 año).

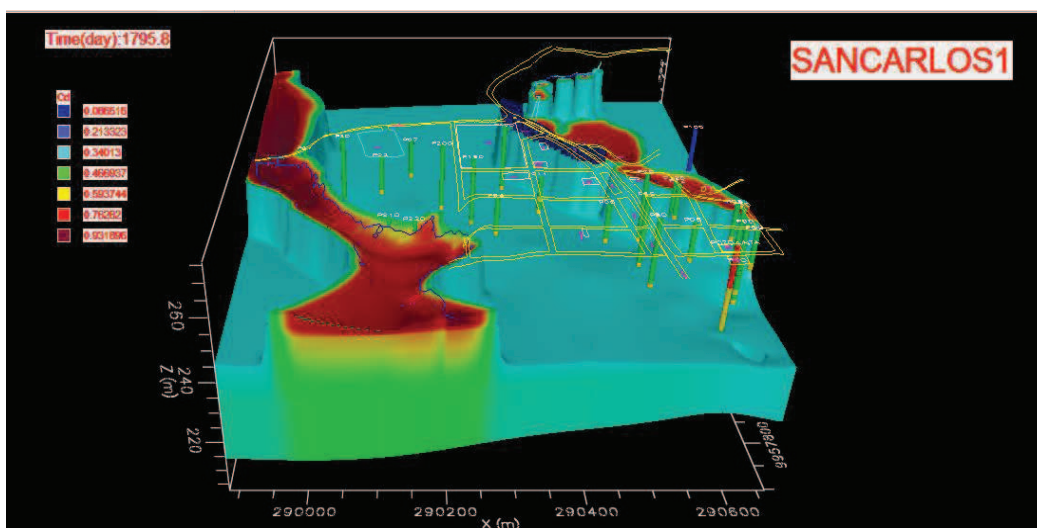


Figura 4.30. Cadmio 1825 días (5 años).

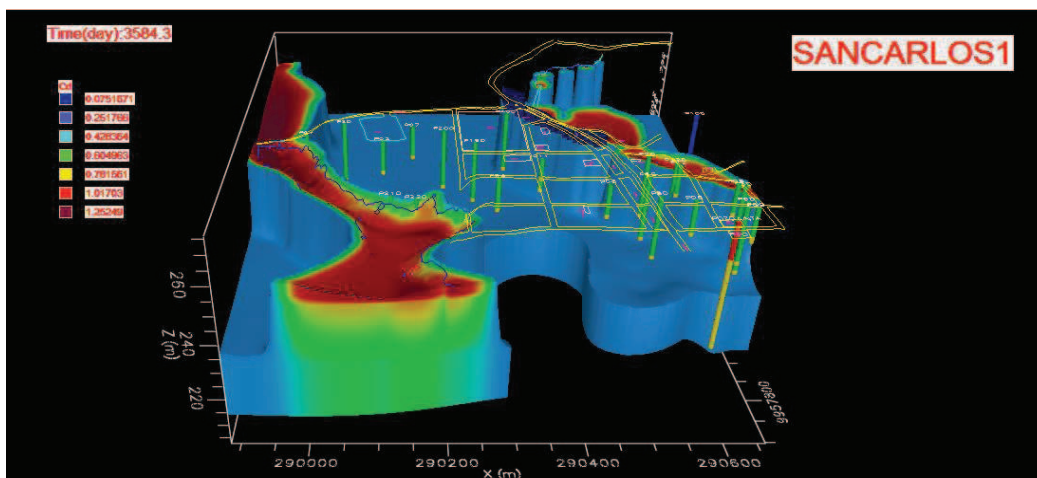


Figura 4.31. Cadmio 3650 días (10 años).

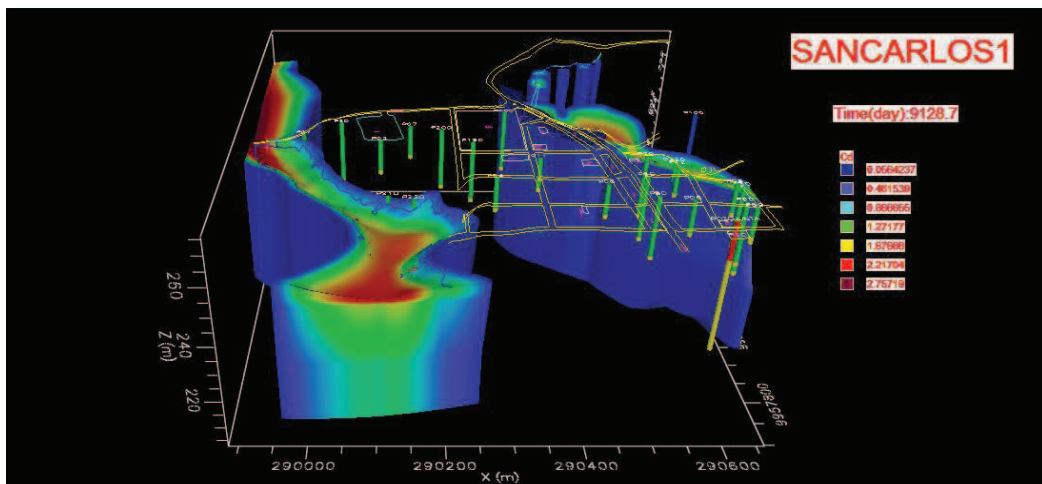


Figura 4.32. Cadmio 9125 días (25 años).

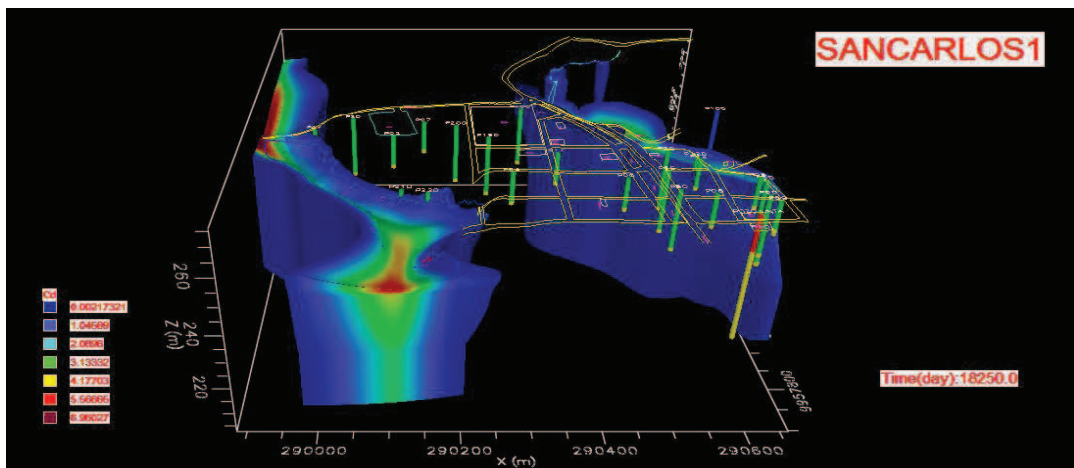


Figura 4.33. Cadmio 18250 días (50 años).

4.5.2 Cadmio: Cadmio Mapas escala 1:2000. 2D, bidimensional.

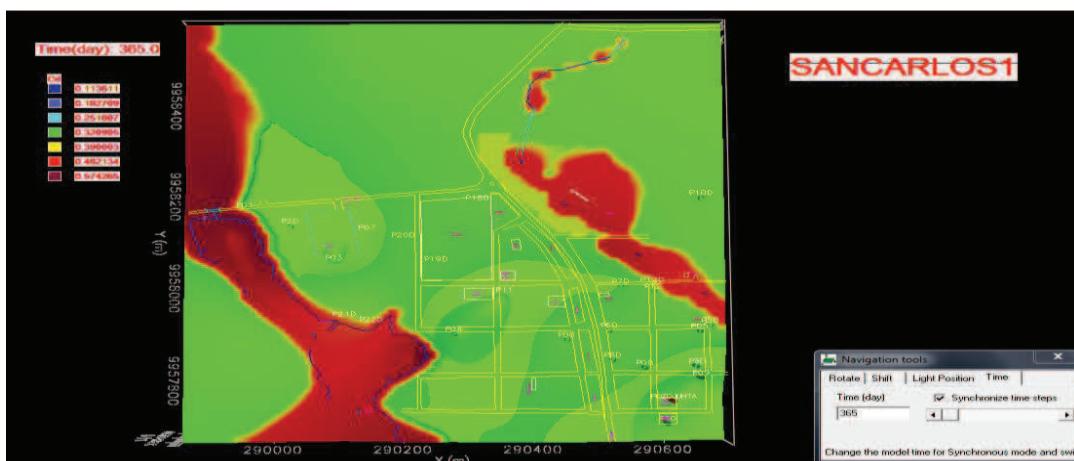


Figura 4.34. Cadmio 365 días (1año).

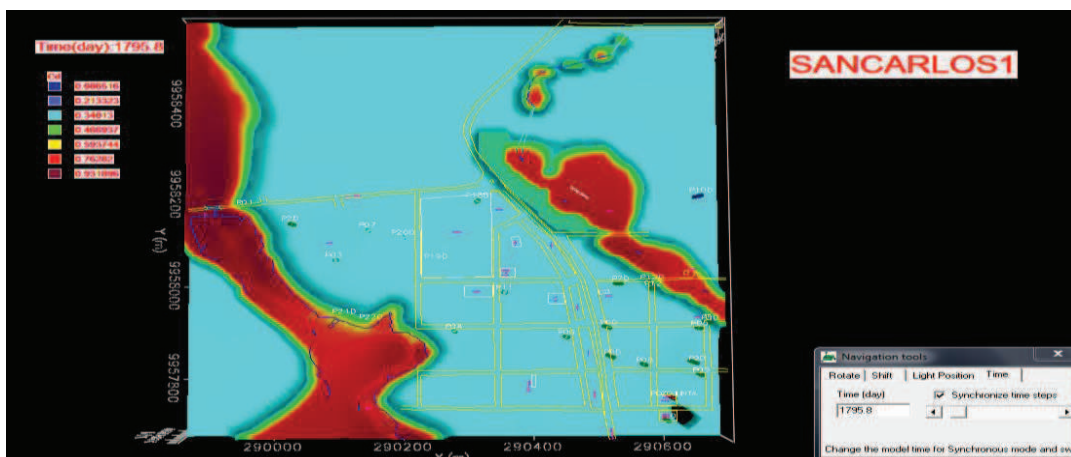


Figura 4.35. Cadmio 1825 días (5 años).

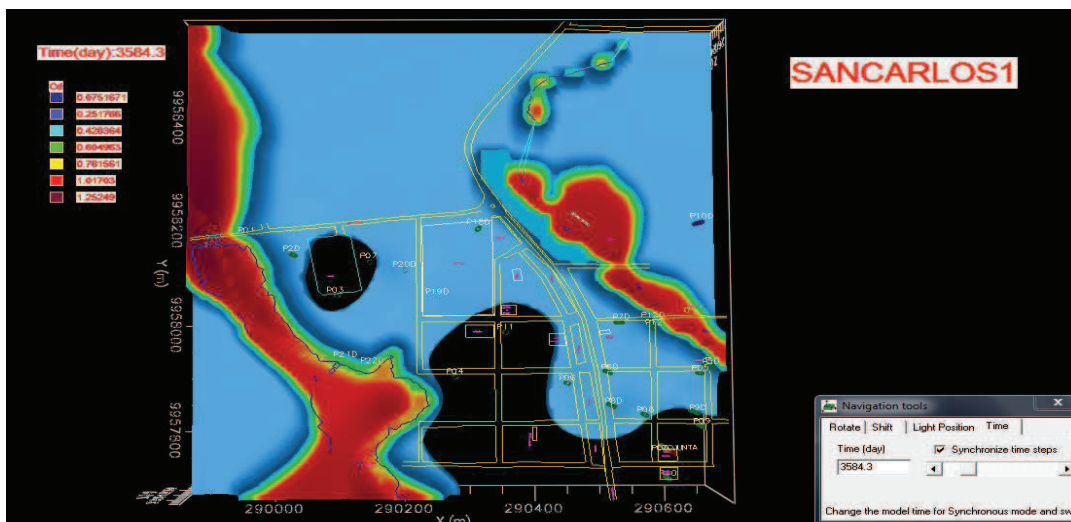


Figura 4.36. Cadmio 3650 días (10 años).

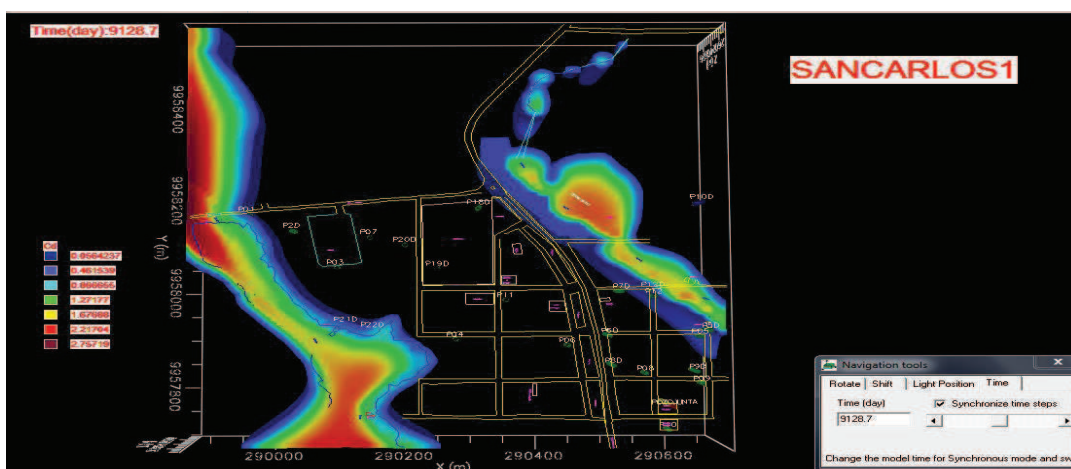


Figura 4.37. Cadmio 9125 días (25 años).



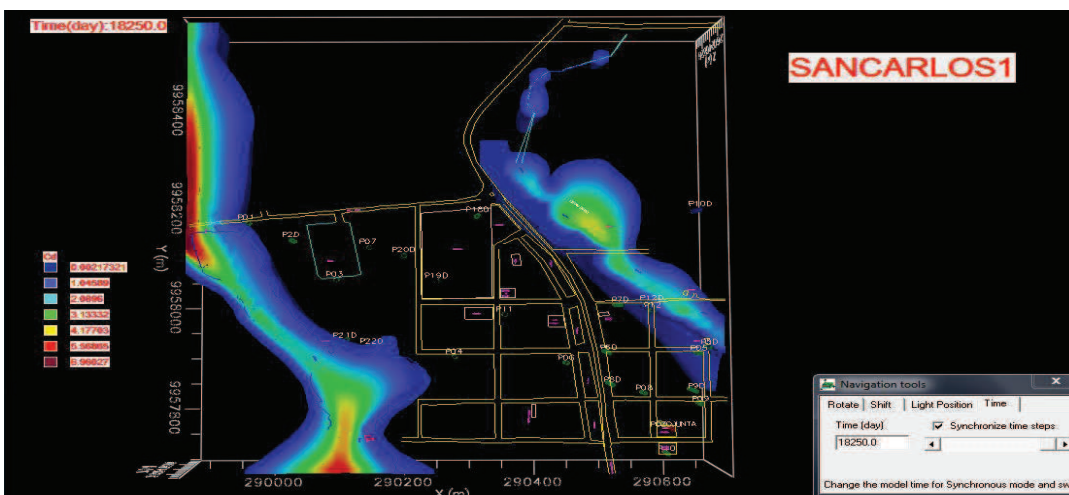


Figura 4.38. Cadmio 1825 días (50 años).

### 4.5.3 Pluma contaminación de Níquel en 3D, tridimensional.

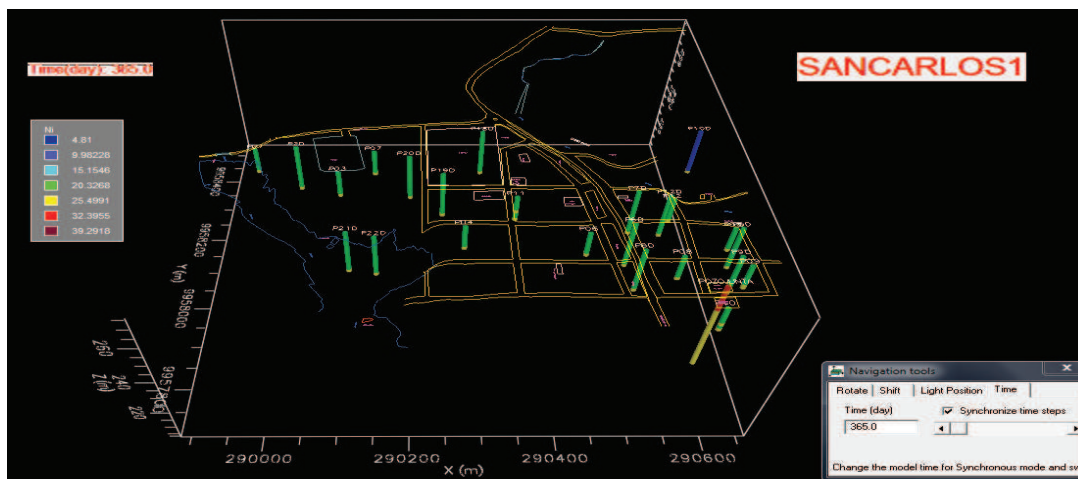


Figura 4.39. Níquel 365 días (1 año).

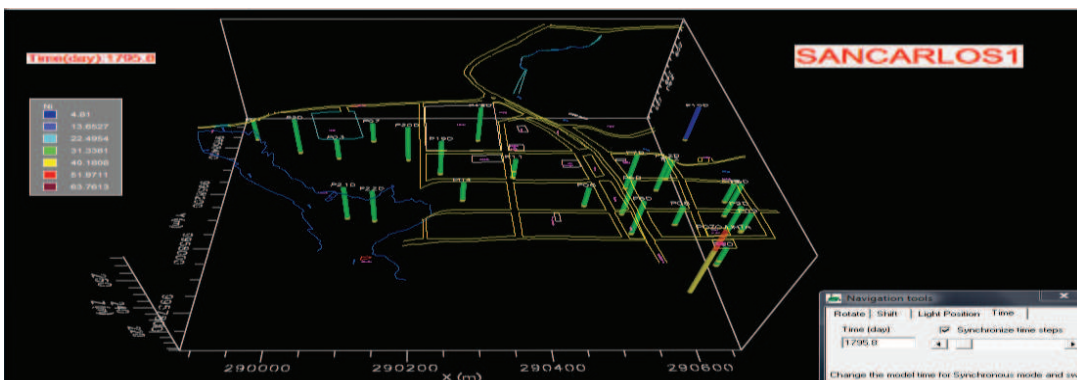


Figura 4.40. Níquel 1825 días (5 años).

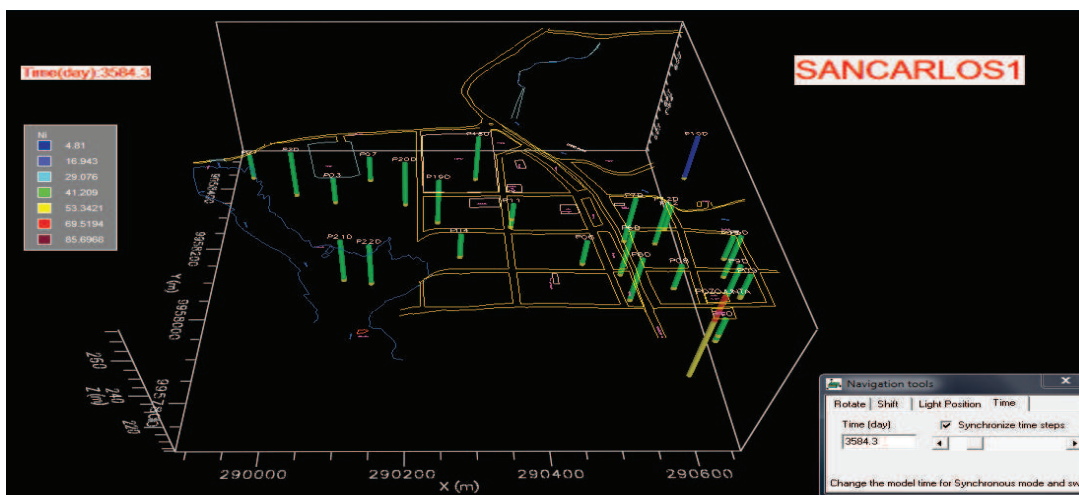


Figura 4.41. Níquel 3650 días (10 años).

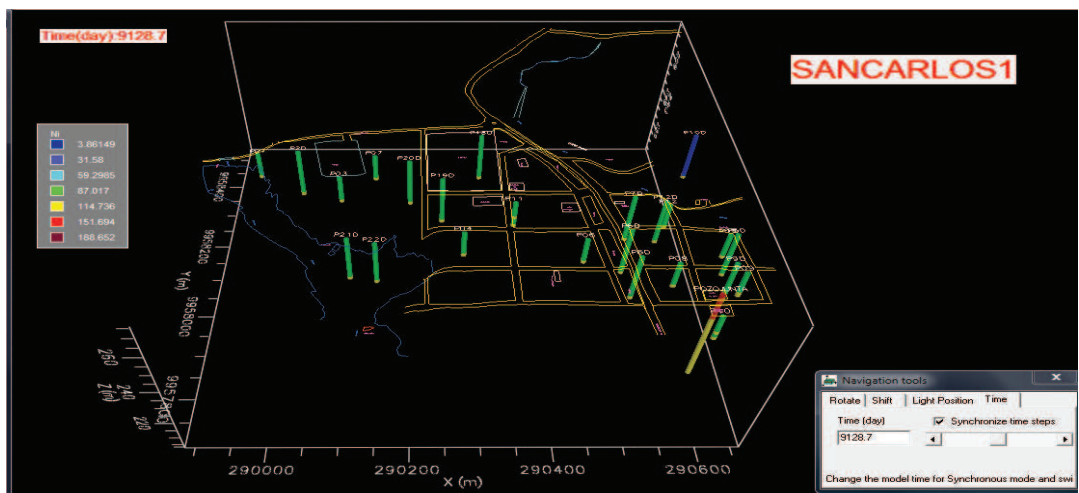


Figura 4.42. Níquel 9125 días (25 años).

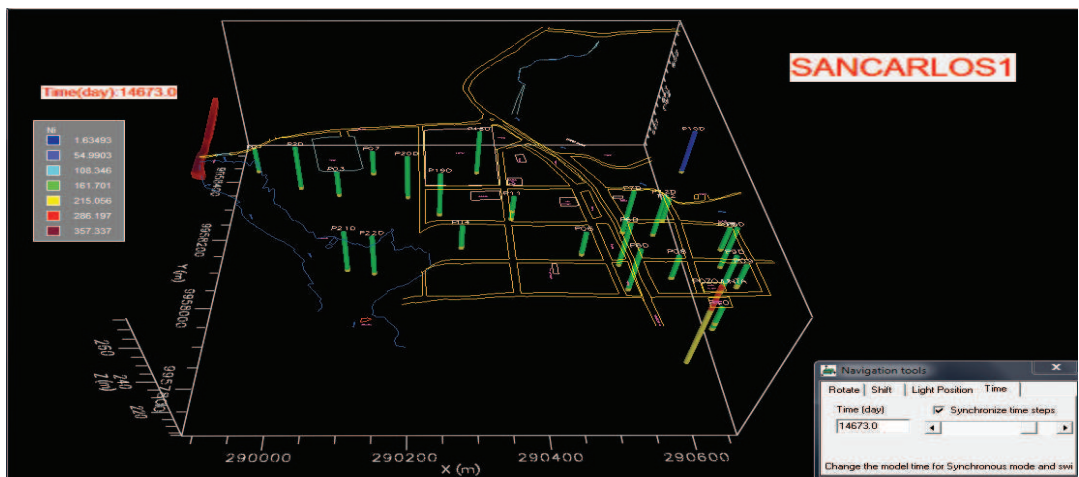


Figura 4.43. Níquel 14673 días (40.2 años).

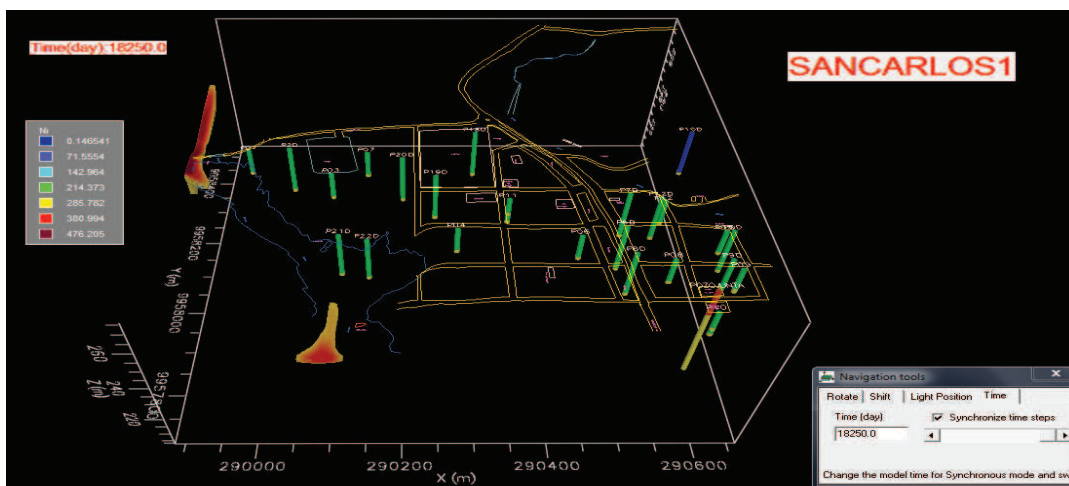


Figura 4.44. Níquel 18250 días (50 años).

#### 4.5.4 Níquel; Mapas escala 1:2000 en 2D, bidimensional



Figura 4.45. Níquel 365 días (1 año).



Figura 4.46. Níquel 365 días (1 año).



Figura 4.47. Níquel 3650 días (10 años).

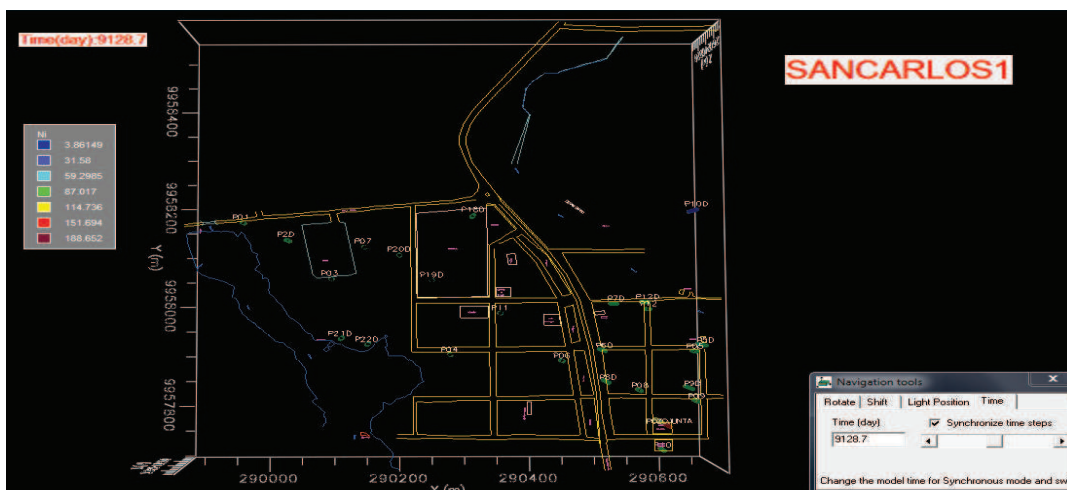


Figura 4.48. Níquel 9125 días (25 años).



Figura 4.49. Níquel 14673 días (40.2 años).

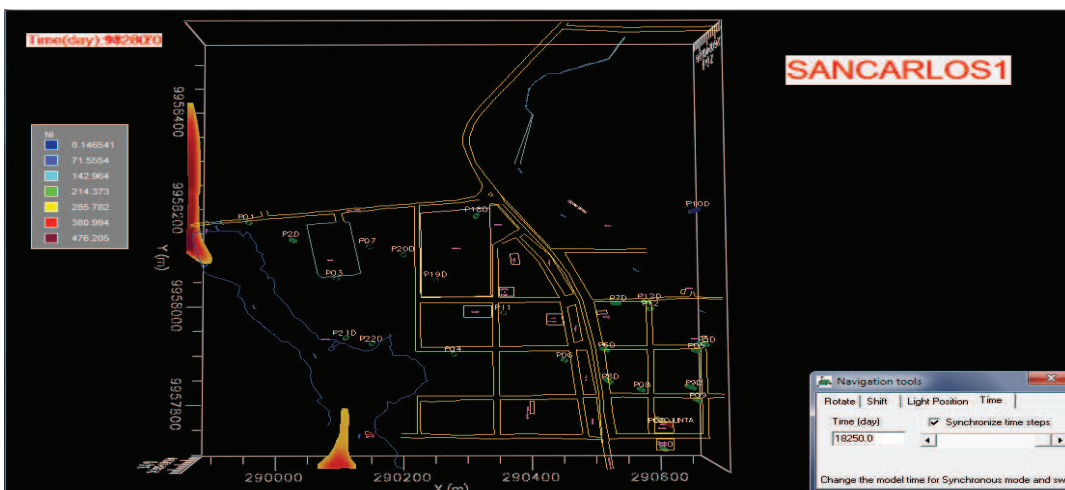


Figura 4.50. Níquel 18250 días (50 años).

### 4.5.5 Pluma Contaminación de Plomo en 3 D, tridimensional

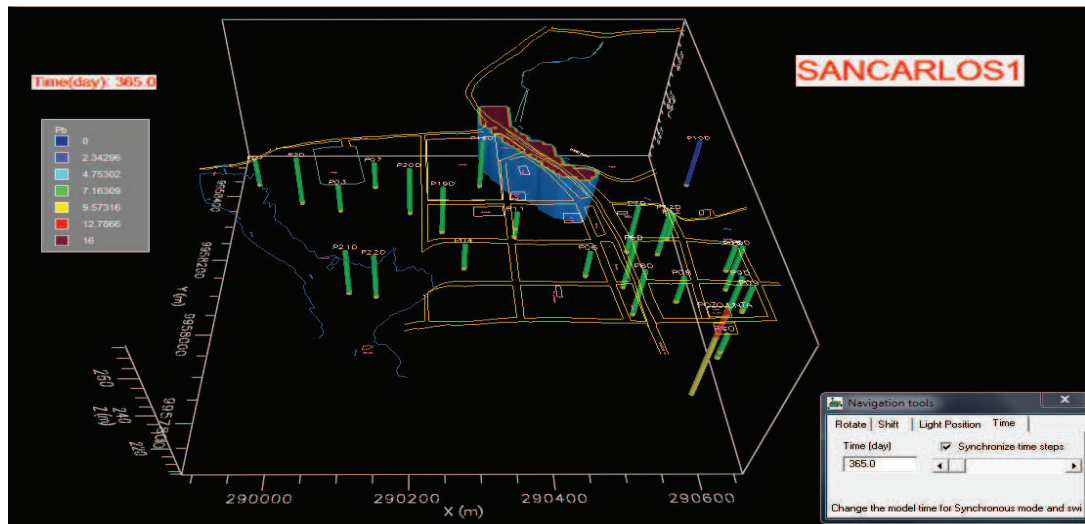


Figura 4.51. Plomo 365 días (1 años).

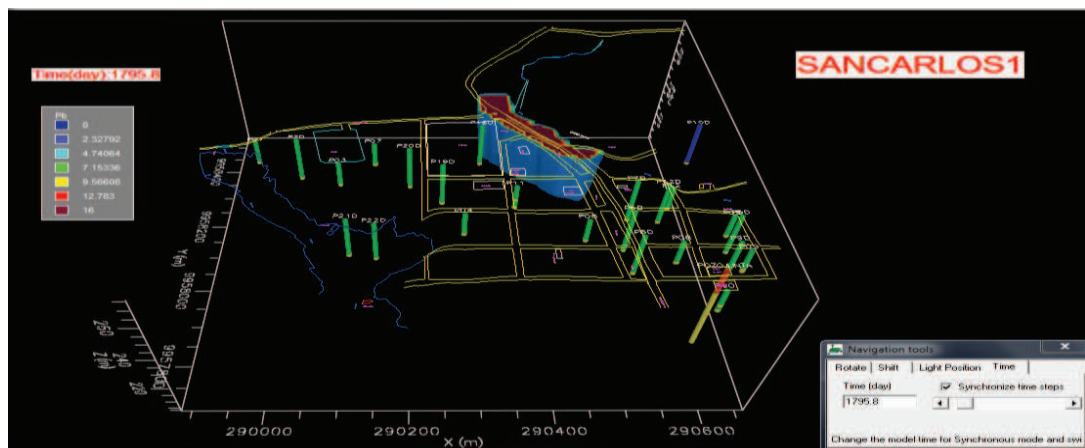


Figura 4.52. Plomo 1825 días (5 años).

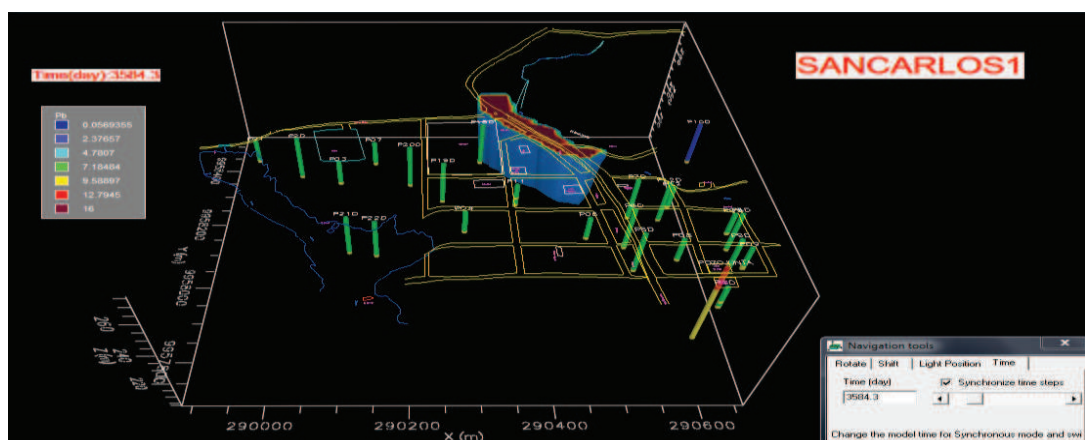


Figura 4.53. Plomo 3650 días (10 años).

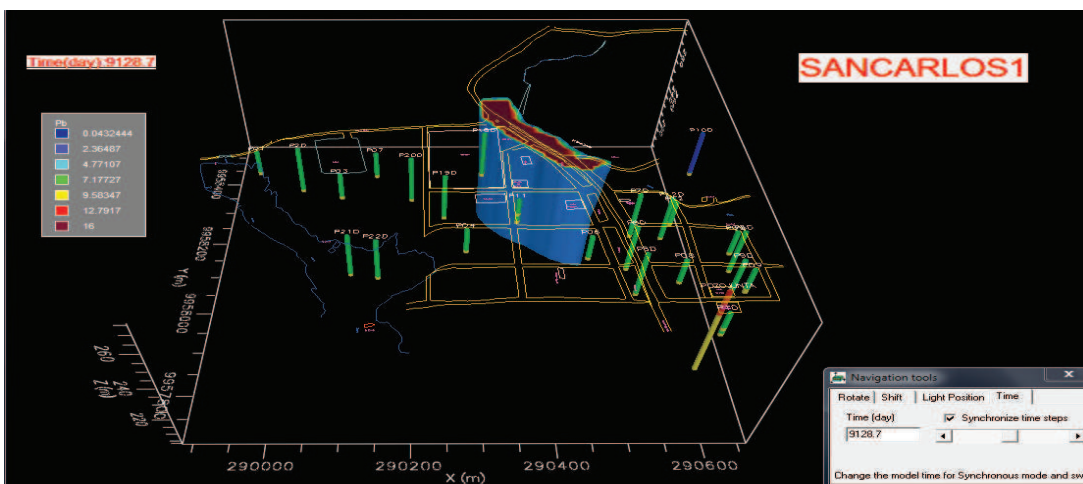


Figura 4.54. Plomo 9125 días (25 años).

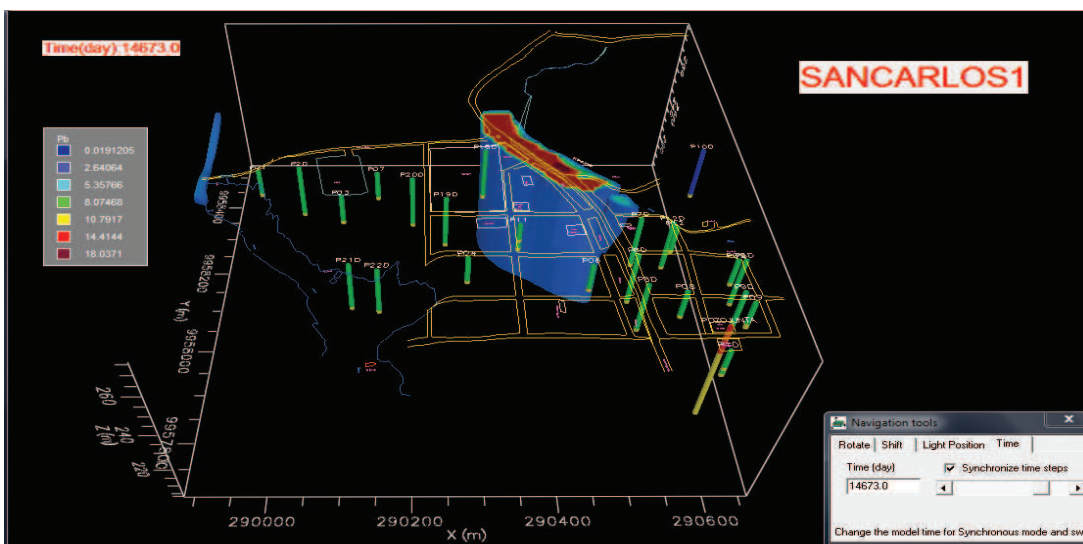


Figura 4.55. Plomo 14673 días (40.2 años).

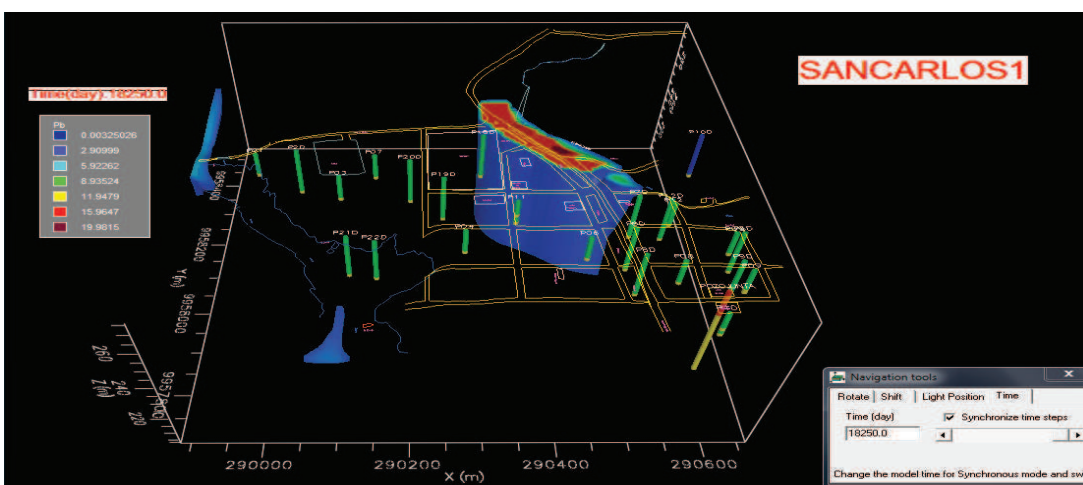


Figura 4.56. Plomo 18250 días (50 años).

#### 4.5.6 Plomo: Mapas escala 1:2000 en 2D, bidimensional.

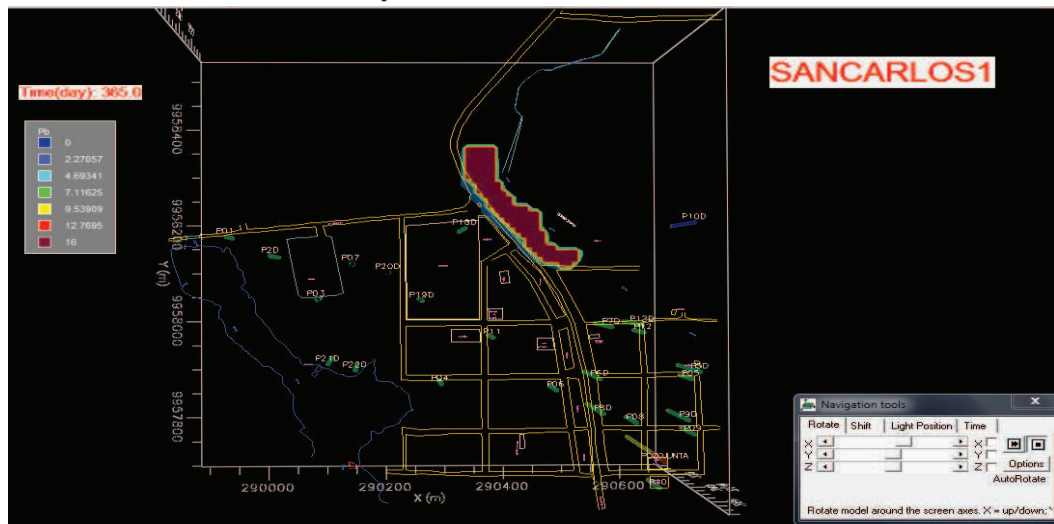


Figura 4.57. Plomo 365 días (1 año).



Figura 4.58. Plomo 1825 días (5 años).

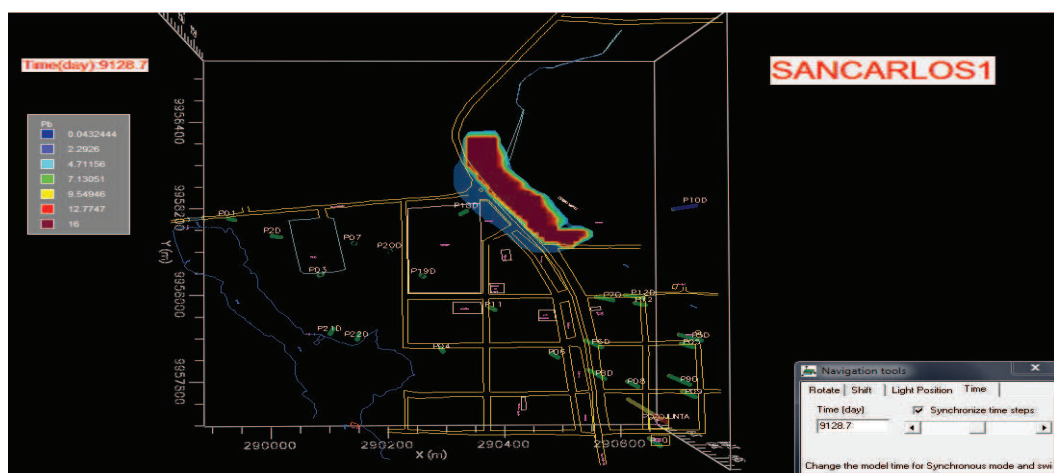


Figura 4.59. Plomo 9125 días (25 años).



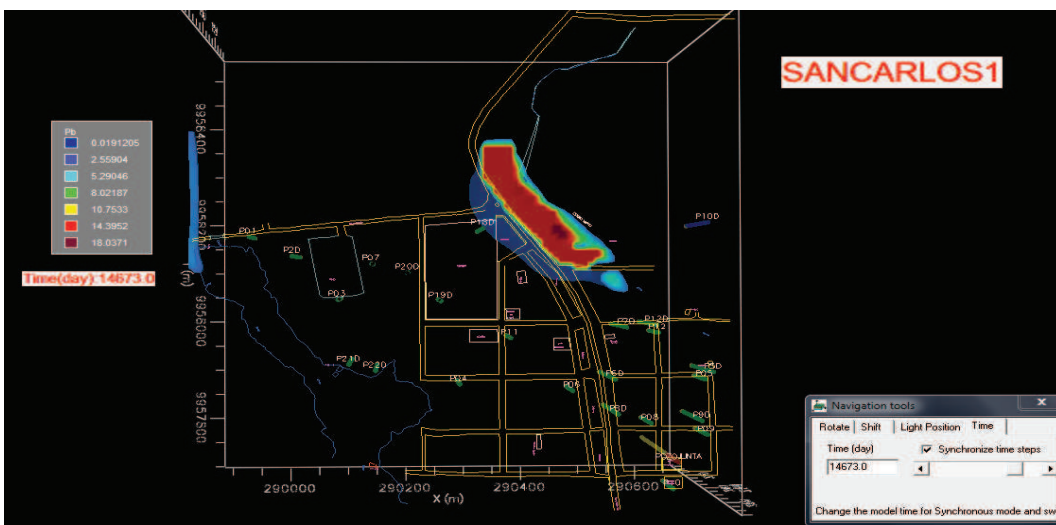


Figura 4.60. Plomo 14673 días (40.2 años).

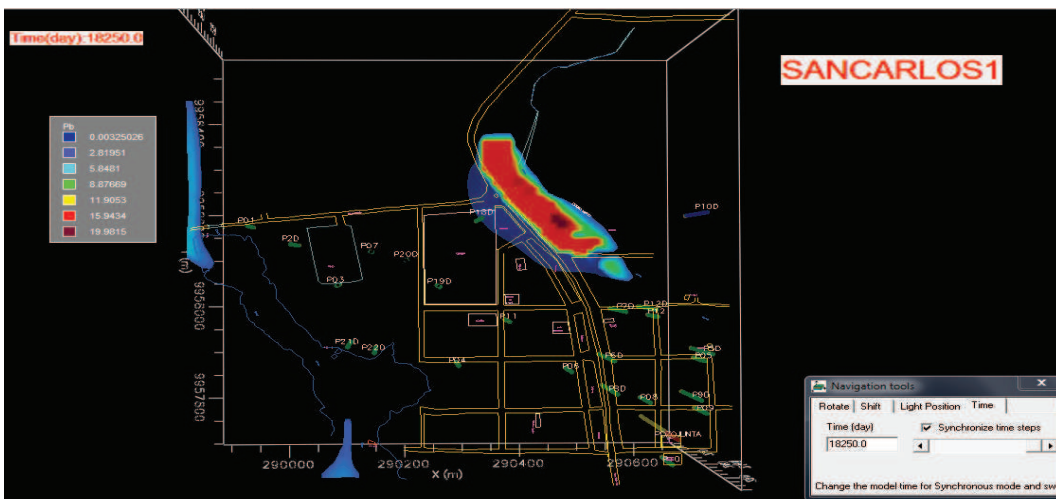


Figura 4.61. Plomo 18250 días (50 años).

#### 4.5.7 Pluma de contaminación Vanadio en 3D, tridimensional

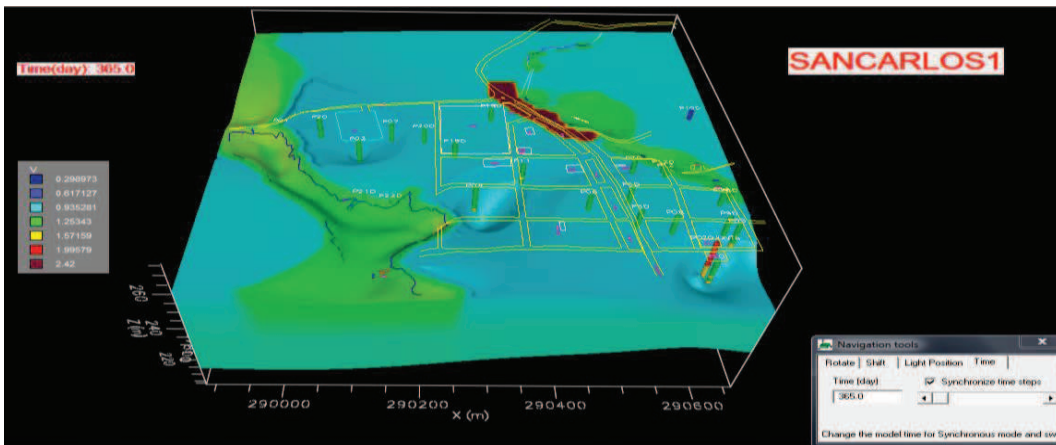


Figura 4.62. Vanadio 365 días (1 año).

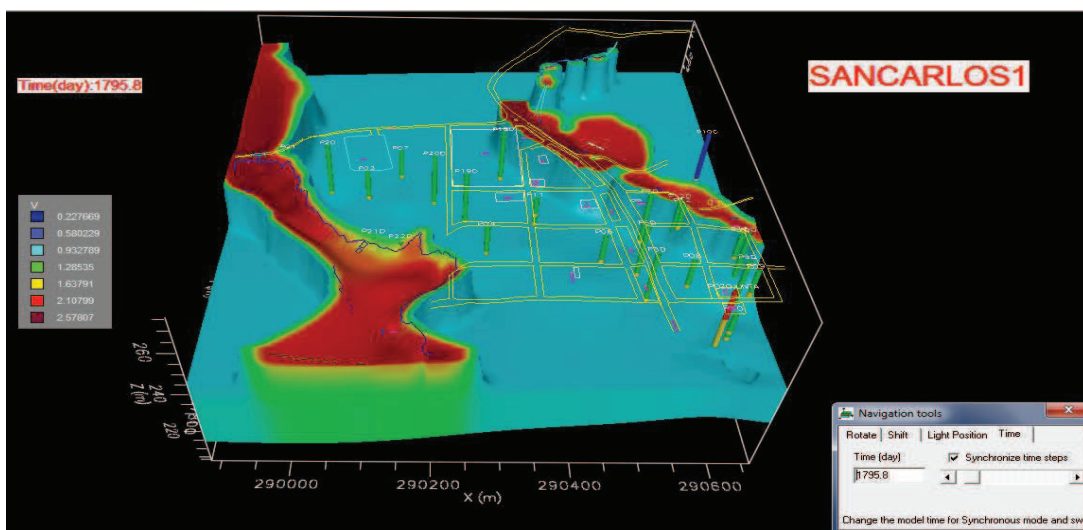


Figura 4.63. Vanadio 1825 días (5 años).

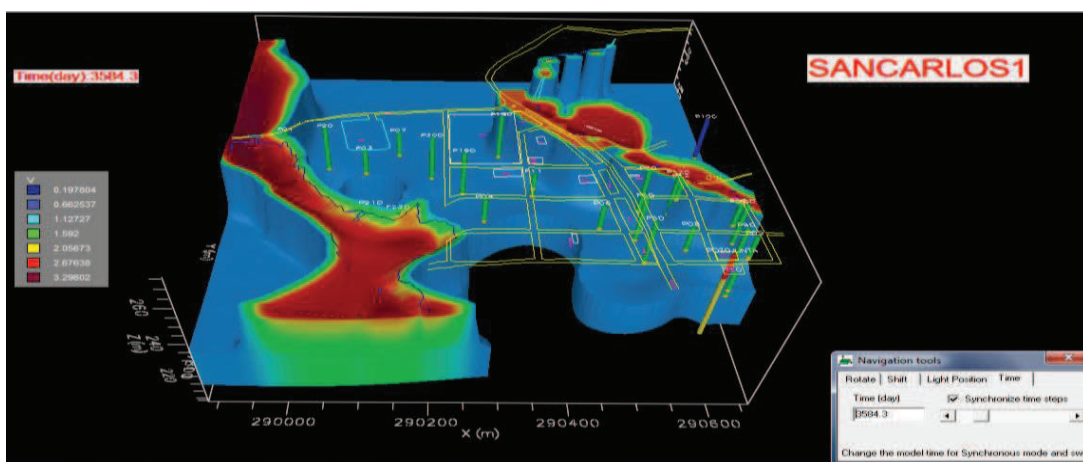


Figura 4.64. Vanadio 3650 días (10 años).

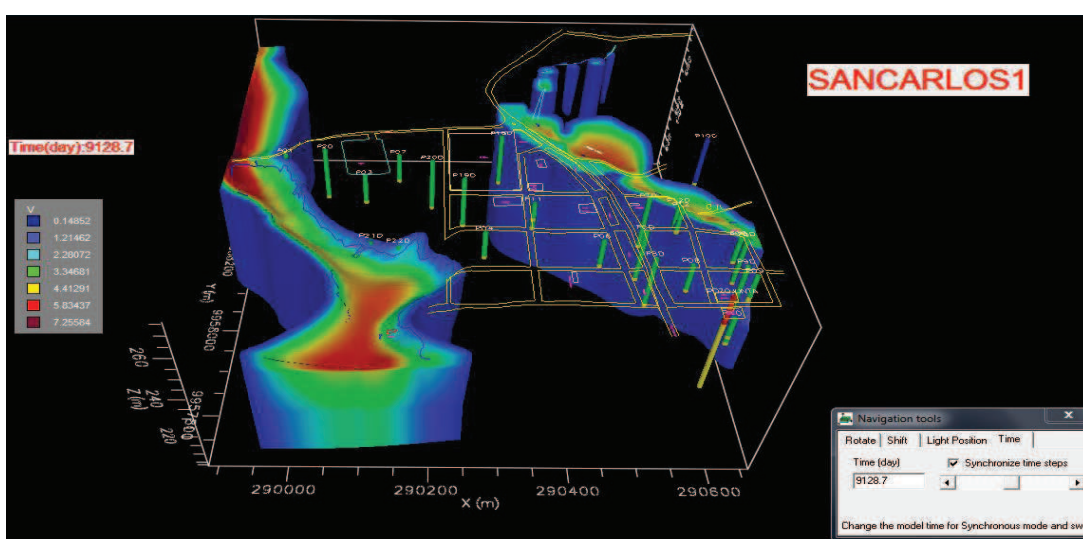


Figura 4.65. Vanadio 9125 días (25 años).

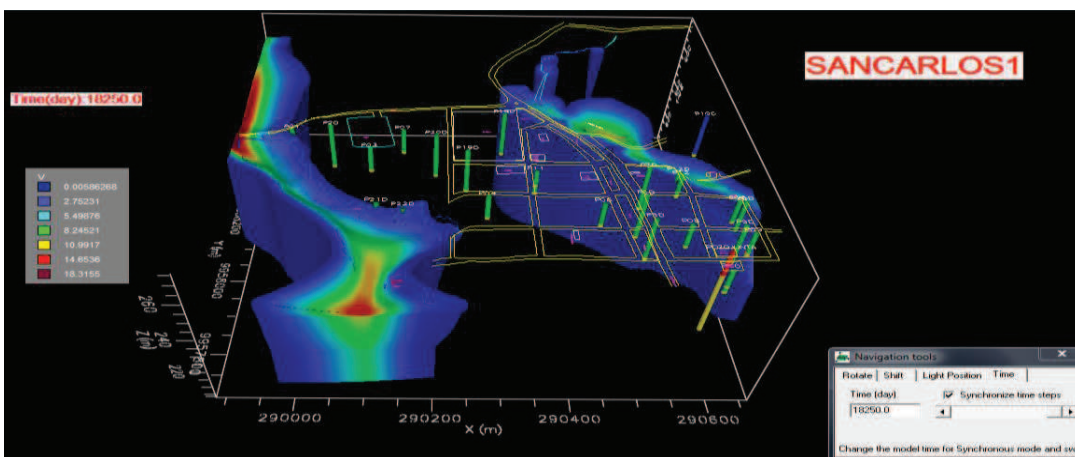


Figura 4.66. Vanadio 18250 días (50 años).

4.5.8 Vanadio: Mapas escala 1:2000 en 2D, bidimensional.

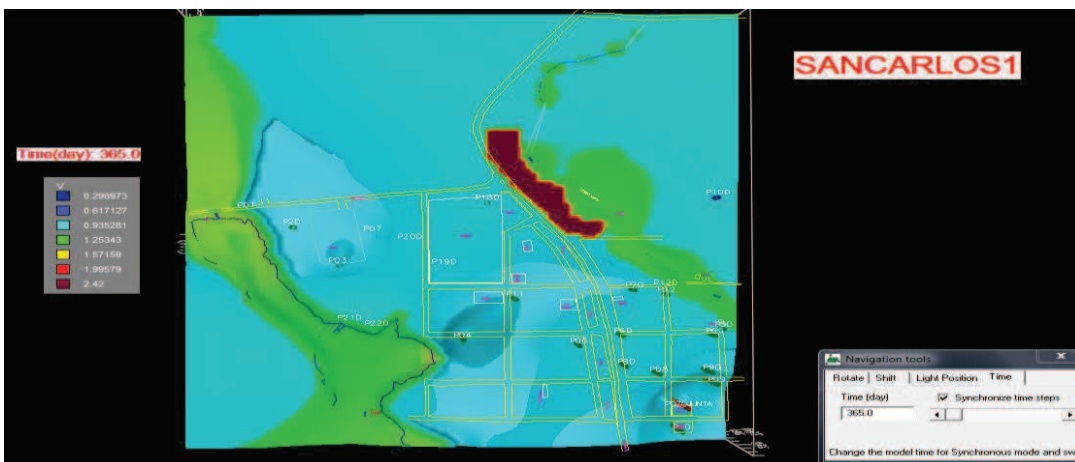


Figura 4.67: Vanadio 365 días (1 año).

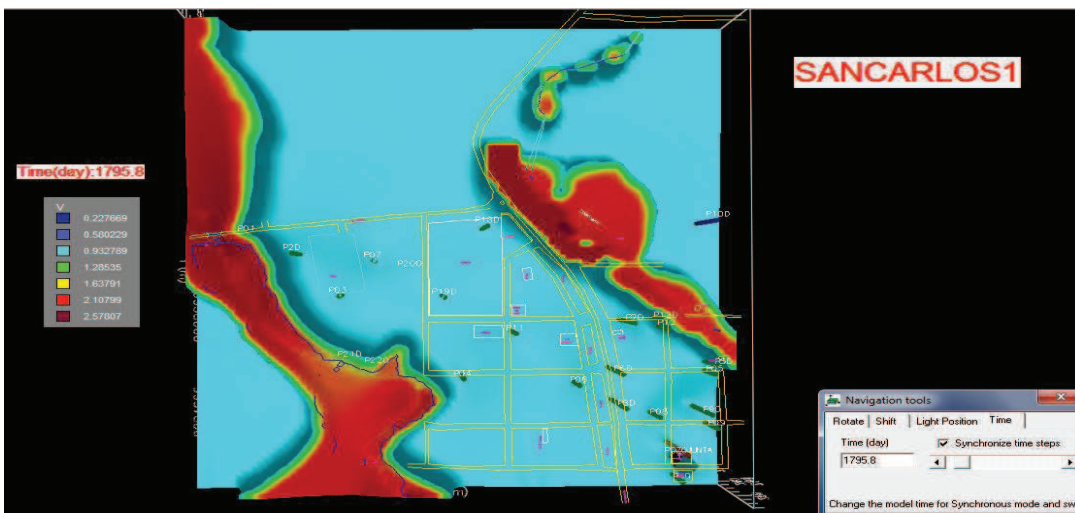


Figura 4.68. Vanadio 1825 días (5 años).

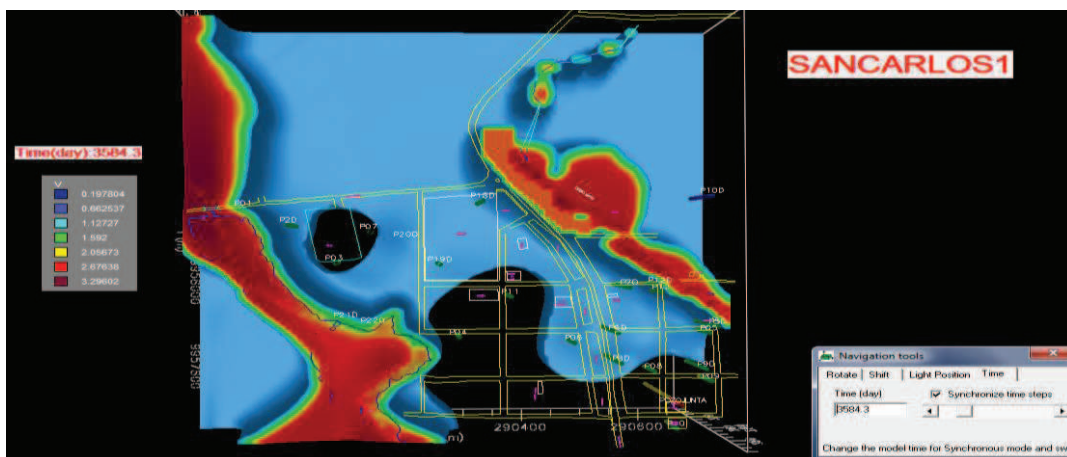


Figura 4.69. Vanadio 3650 días (10 años).

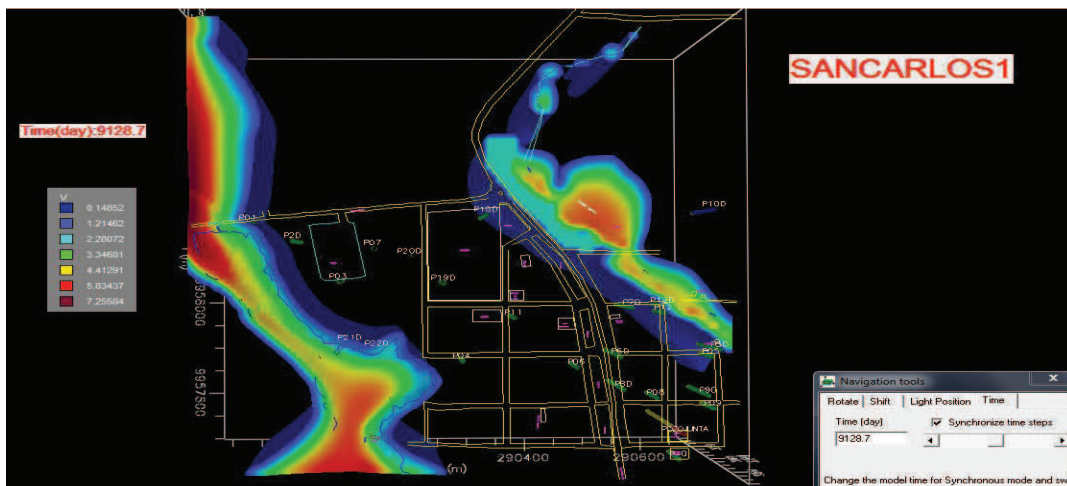


Figura 4.70. Vanadio 9125 días (25 años).



Figura 4.71. Vanadio 18250 días (50 años).

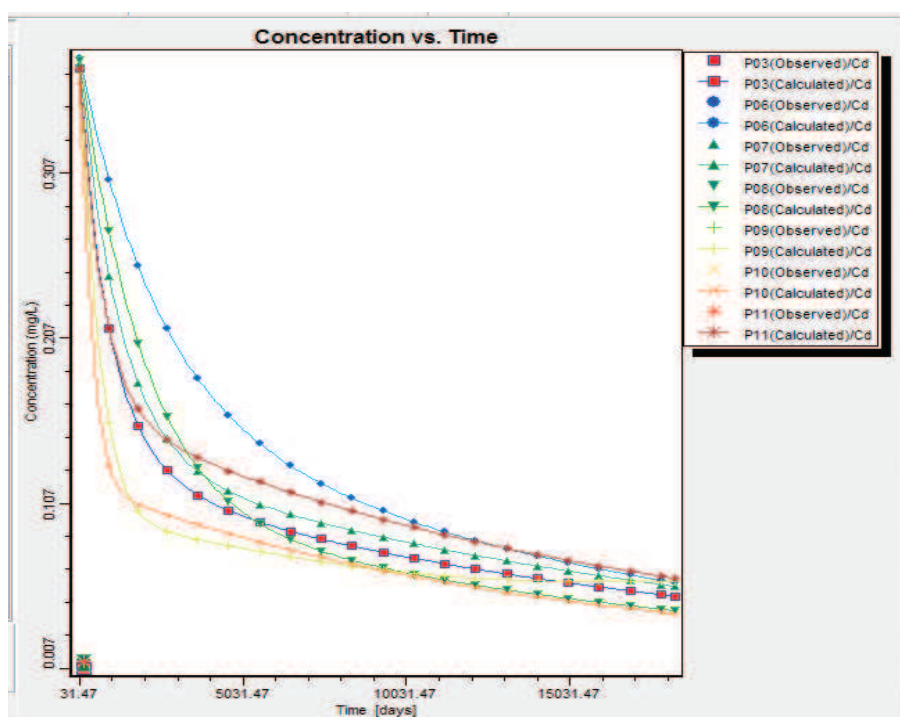


Figura 4.72. Concentración Cadmio versus tiempo.

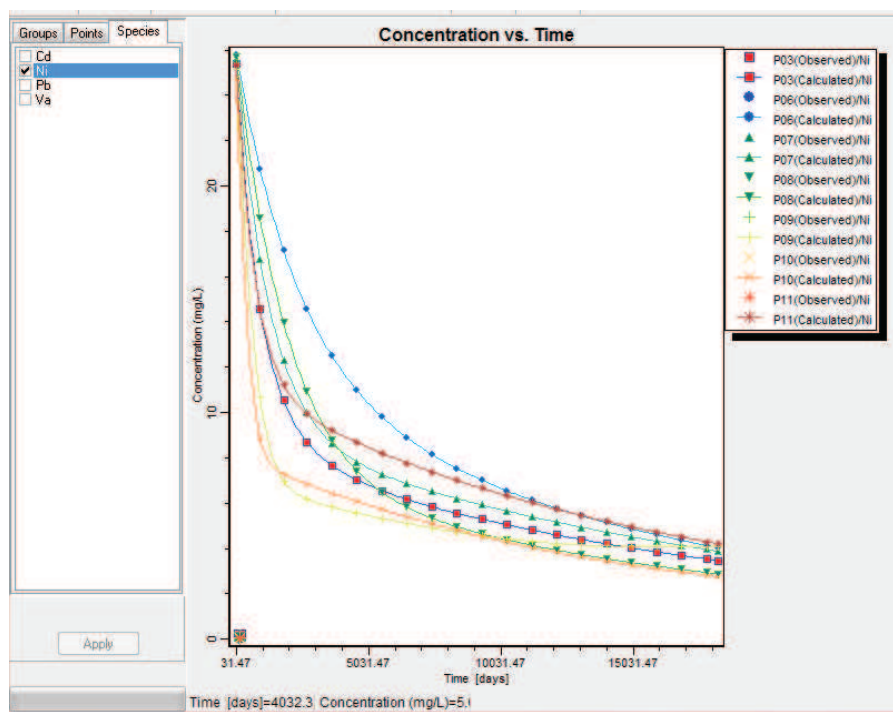


Figura 4.73. Concentración Níquel versus tiempo.

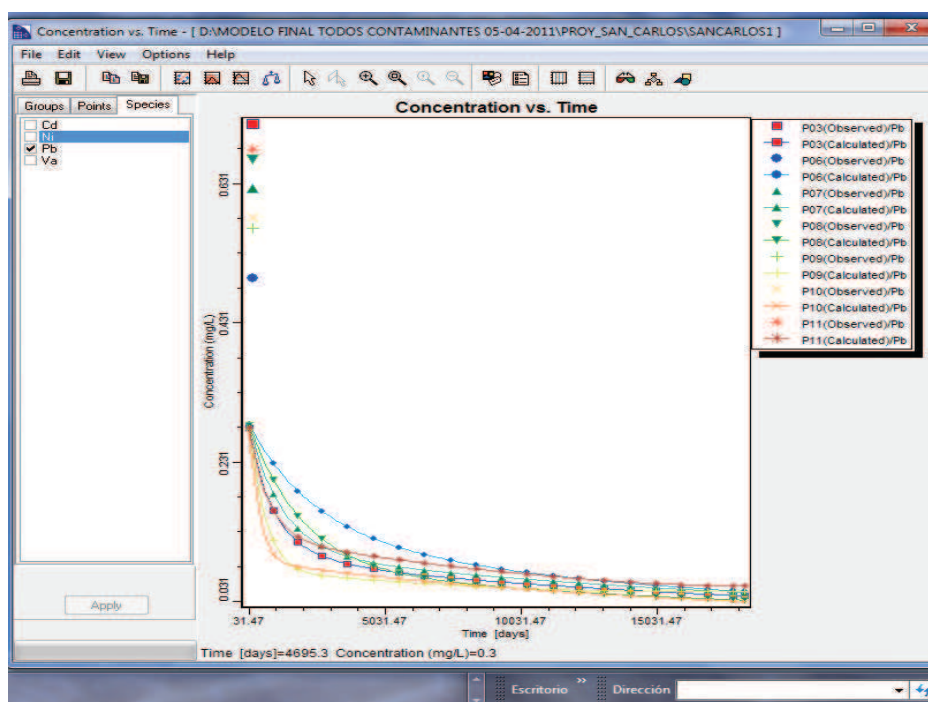


Figura 4.74. Concentración plomo versus tiempo

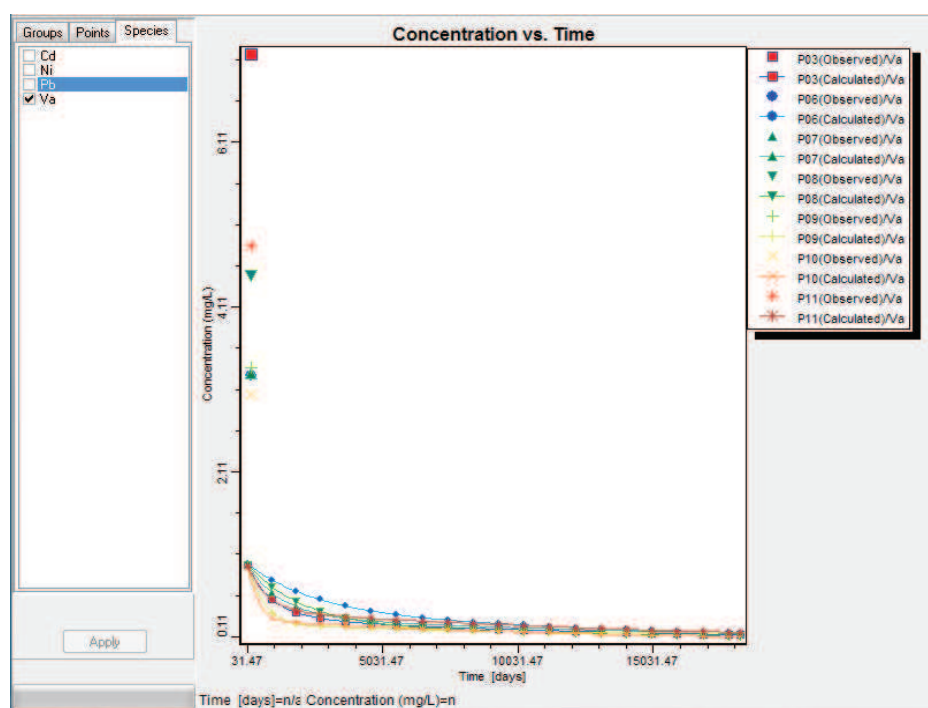


Figura 4.75. Concentración Vanadio versus tiempo.

## CAPITULO V

### DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

#### 5.1 DE LA GEOFÍSICA

Mediante ensayos de refracción sísmica, se elaboraron perfiles geosísmicos a fin de establecer una tomografía del subsuelo. Estos perfiles proporcionan una estratigrafía aproximada del sitio con espesores de las capas y del tipo de suelo asociado con los espesores identificados por la velocidad que alcanzan las ondas de compresión durante su viaje al refractarse en dichos suelos.

En la Tabla 5.1 se presenta la correspondencia entre la geofísica y la geología local. Se hallaron tres complejos sísmicos que prevalecen en el subsuelo, el A con espesores de 0 a 8.5 m con velocidades de hasta 300 m/seg que corresponden a depósitos de suelos hacia la superficie constituidos en su mayoría por limos arenosos. Un segundo complejo B con espesores que varían entre 7 a 25 m. Con velocidades entre 1000 a 2000 m/seg, que corresponden a arenas de diferente compacidad. Un tercer complejo C con espesores mayores a 30 m, con velocidades entre 2000 a 4000 m/seg, que corresponde a un basamento de roca arenisca.

**Tabla 5.1**  
**Correspondencia geológica**

<b>Complejo sísmico</b>	<b>Variación espesor (m)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Correspondencia Geológica</b>
<b>A</b>	0 a 8.5 m	300	Suelo superficial limos arenosos
<b>B</b>	7 a 25 m	1000–2000	Arena fina
<b>C</b>	Mayor a 30 m	2000–4000	Roca Arenisca

Una representación de modelos estratigráficos solapados entre dos líneas sísmicas consecutivas permite entonces obtener un perfil estratigráfico aproximado en todo el subsuelo del área urbana.

En la Figura 3.14 se muestra que las líneas sísmicas LS1 y LS8 generan una secuencia de tres grandes estratos que permiten definir un modelo inicial: A) Limos hacia la superficie B) Arenas finas C) Roca Arenisca meteorizada

Tomando en cuenta la diferencia de escala horizontal y vertical la Figura 3.12 observada en sentido N-S muestra un mayor espesor de los estratos en el complejo sísmico hacia el área contigua al Estero Sapito.

La Figura 3.13 perfil solapado entre las líneas sísmicas 2 y 6 y la Figura 3.14 perfil solapado entre líneas sísmicas 1 y 8 los estratos tienen un mayor espesor en área adjunta al Estero Sapito, esto quiere decir que los espesores principalmente del estrato de arena son mayores en dirección N-S.

En base a las investigaciones geofísicas se ha podido establecer lo siguiente:

El complejo sísmico A corresponde a un depósito de suelo superficial que, reciente con edad cuaternaria, se extiende bajo toda la parroquia.

Se observa en las capas de los perfiles la existencia de un acuífero regional debajo del pueblo de San Carlos con flujo de agua constante.

Existe un mayor espesor de los complejos A y B en el área del Estero Sapito por tanto existe la posibilidad de filtración de agua y contaminantes desde el estero Sapito hacia el río Huamayacu, por debajo del pueblo.

En los cortes longitudinales Este- Oeste se observa que las capas de los complejos A y B disminuyen sus espesores hacia los costados del pueblo, pero aumentan en dirección Norte – Sur formando una concavidad bajo el pueblo, tal que el complejo B actúa como un acuífero superior.



Se observa principalmente en el Perfil Sísmico 9 que el contacto entre el complejo B (arenas) y la roca basal (areniscas) manifiesta una pendiente con buzamiento hacia el río Huamayacu. Luego el agua puede filtrar desde el estero hacia el río. El complejo B es parte de un acuífero regional.

La diferencia de alturas entre el estero Sapito (261 msnm) y el Río Huamayacu (256 msnm) crea un gradiente capaz de producir un flujo de agua desde el estero hasta el río. Con una diferencia de alturas promedio de 5 m y una distancia entre estero y río que varía entre 510 m a 887 m.

## **5.2 DE LOS SONDEOS**

A nivel regional, el área de estudio se extiende sobre la formación geológica Chambira en la que predominan los conglomerados, areniscas y lutitas meteorizadas. Los materiales retrabajados de la formación Chambira han sido transportados hasta ser depositados como aluviales de tamaño fino; arenas, limos arcillosos y arcillas (INEMIN, 1989).

Los 22 sondeos de perforación confirman los espesores de las capas calculados según datos de geofísica de refracción y mencionadas en la sección anterior, con una estratigrafía del subsuelo más exacta.

Por ejemplo se puede definir claramente el espesor de las capas limosas arenosas en el P20D con un espesor de 7.5 m, en P19D un espesor de 5.5 m, en P6D un espesor de 8.5 m, en el P9D un espesor de 6.5 m, en el P03 un espesor de 4.8 m, en el P04 un espesor de 3.5 m, en el P06 un espesor de 9 m, en P08 un espesor de 8 m, en P09 un espesor de 5 m. estos espesores pasan a definir una capa de limos arenosos que confinan un acuífero de arenas finas que subyacen a esta capa.

Bajo el estrato de limos se encuentra una arena de grano fino de hasta los 20 m de profundidad. Subyace roca arenisca de la formación Chambira que aflora en el cauce del río Huamayacu al W del pueblo.

### **5.2.1 Sondeos de exploración**

Se ha tomado cinco sondeos representativos en dirección Este – Oeste; a saber P03, P04, P06, P08, P09, en los cuales, al observar el perfil estratigráfico se muestra una sucesión de capas de limos arenas finas y lentes de arcillas esporádicos a las que subyace una capa de arena fina limosa de mayor espesor.

Los limos tienen espesores que pueden llegar a 9.0 metros, los lentes arcillas espesores menores que 1.0 m. La secuencia de limos superficiales sobre arenas limosas se da en toda el área de estudio, con la consiguiente variación de los espesores.

Se nota un aumento del espesor de la capa superficial de limos hacia el centro de San Carlos con una disminución de los espesores hacia los costados. Disminuye el espesor hacia el Rio Huamayacu y aumenta hacia el Estero Sapito.

### **5.2.2 Respecto al tipo de suelo**

En todos los pozos hacia la superficie los suelos recuperados han sido clasificados en su mayoría como limos (MH, ML) con arenas finas, lentes de arcilla esporádicos y más al fondo se encuentran arenas limosas (SM). A profundidades mayores a 20 m se encuentra un basamento roca arenisca.

Hasta las profundidades correspondientes a los sondeos someros, existe un predominio de limos arcillosos con capas de arcillas. La variación lateral es muy poca, lo que cambian son los espesores de los suelos mencionados.

La plasticidad de los suelos disminuye con la profundidad, eso indica que los depósitos aluviales de suelos con índices de plasticidad altos son superficiales y hay una tendencia, en todo el subsuelo, al apareamiento de arenas al aumentar la profundidad.

Este tipo de configuración estratigráfica son típicos de suelos con tipo de depósitos sedimentarios donde el material más grueso y transportado se deposita abajo por ser más pesado y el material más fino se deposita en la

parte superior, pero también se pueden originar como depósitos residuales, es decir, la roca original se meteorizó y en la superficie prevalecen los suelos más finos y arcillosos y hacia el fondo aumenta el tamaño con disminución de plasticidad y porcentajes de finos plásticos.

Hay un predominio de limos de alta compresibilidad MH hasta aproximadamente los 5 m de profundidad, luego subyacen capas de arenas de grano fino limosas de baja plasticidad. Esta sería una tendencia aproximada de toda la estratigrafía del subsuelo en San Carlos hasta los 10 m de profundidad.

Los porcentajes de humedad alcanzan hasta el 110% en pozo P21D (de 6.5 a 7m), existiendo una tendencia en la mayoría de los pozos a una disminución de la humedad con la profundidad. Los suelos finos limos arcillosos captan mayor humedad que las arenas limpias.

La plasticidad de los suelos disminuye con la profundidad, eso indica que los depósitos aluviales de suelos con índices de plasticidad altos son superficiales y hay una tendencia al apareamiento de arenas al aumentar la profundidad hasta los 20 m donde aparece la roca arenisca

### **5.2.3 Respecto a la estratigrafía.**

El análisis de las columnas estratigráficas muestra un proceso de sedimentación en el que se definen claramente dos depósitos, a saber:

Un depósito superficial reciente de una sucesión de limos de alta y baja compresibilidad.

El segundo depósito lo constituye una arena fina que subyace a la anterior, en profundidad la arena alcanza grados de alta compacidad y se han encontrado relictos de roca sedimentaria arenisca.

La estratigráfica de las capas del suelo corresponde al perfil resultado de la meteorización de la roca arenisca y al transporte de los materiales retrabajados de la Formación Chambira, del mioceno plioceno (5.3 a 2.6

millones de años), hasta ser depositados como arenas de tamaño fino limos arcillosos y arcillas (INEMIN;, 1989).

### 5.3 De la hidrología

La hidrología estudia la distribución y circulación del agua en la superficie de la Tierra, en la corteza terrestre y en la atmósfera. Esto incluye las precipitaciones, la evapotranspiración, escorrentía, la humedad y el agua de infiltración.

A nivel regional el área la parroquia San Carlos está en la cuenca de afluentes del río Napo, hacia el Norte está el río Eno, al Este los ríos Jivino Rojo y Jivino Verde, al Oeste el Río Coca , todos ellos tienen una dirección N-SE , el río Napo corre en dirección de W-E en su cauce superior, cambiando su dirección de flujo hacia el S-E como afluente del río Amazonas. Entre el río Jivino Verde y el río Coca en dirección S-SE corren



**Figura 5.1: Río Huamayacu y Estero Sapito**

los ríos Pindoyacu, Huamayacu, Pimanpiro, Sacha entre otros de menor caudal como los ríos Basura y Puerco todos afluentes del Napo.

San Carlos hacia el NE está limitado por el estero Sapito de carácter intermitente con caudales muy bajos y dependientes de la cantidad de lluvias, hacia el W está limitado por el río Huamayacu que tiene mayor caudal que el estero. El estero recibió desechos de agua de formación desde

campo Sacha Sur por mucho tiempo (según comunicación de los habitantes), lo cual originó un foco de contaminación

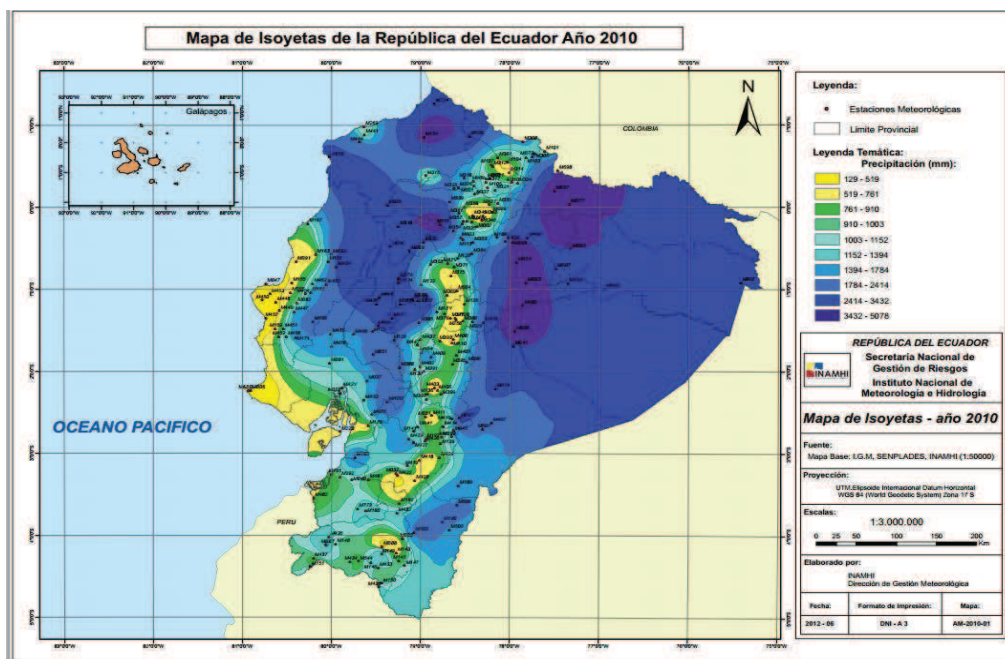
Los parámetros geo hidráulicos son complicados de medir, ya que los depósitos superficiales no son homogéneos tanto en el suelo como en los espesores de las capas de limos intercalados con capas de arenas.

De manera que, por ejemplo, la permeabilidad para todo un estrato de suelo cuyo espesor y granulometría es variable en todas direcciones debe ser cuidadosamente calculada, tal que, dependiendo de las condiciones de borde sea posible calibrar el modelo.

A continuación se discuten los valores correspondientes a precipitación, evaporación y recarga, debe aclararse que el término recarga corresponde en el modelo al porcentaje de infiltración de agua en el suelo.

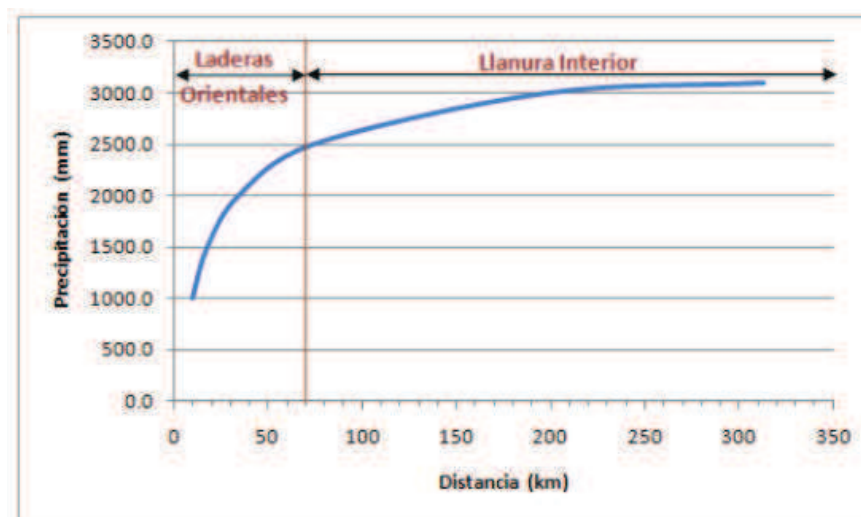
### **5.3.1 Precipitación**

Según los reportes de INAMHI para la estación del aeropuerto Coca en el período de 2005 a 2008 la precipitación varía entre los rangos de 2650 a 4500 mm/año, con una precipitación media anual de 3400 mm/año. Con mayores precipitaciones máximas entre Abril (453.8 mm) y Diciembre (329.2 mm) y la época menos lluviosa entre Julio a Noviembre (199.3 mm). Esto se confirma en el mapa de isoyetas del Ecuador (INAMHI, 2012) donde se puede apreciar que la precipitación está en el rango de 3432 a 5078 mm, por tanto es una zona muy lluviosa.



**Figura 5.2: Mapa isoyetas del Ecuador. Fuente INAMHI, 2012**

En la Figura 5.3 se observa el valor de la precipitación media para las provincias de Napo y Orellana tomados del análisis de Villacrés 2010, según el cual, para las provincias de Napo y Orellana se tiene un valor de precipitación media de hasta 3200 mm al año.



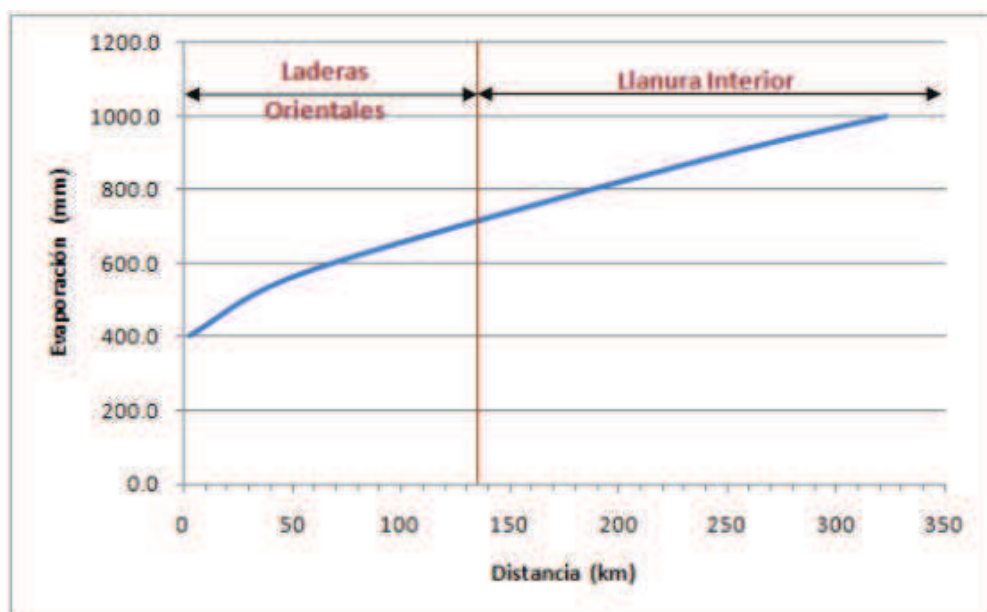
**Figura 5.3: Gradiente de variación de la precipitación media anual a lo largo de las provincias Napo y Orellana . Fuente Andrade, et al, citado por Villacrés (2010).**

En base a las anteriores referencias se toma como precipitación para el modelo un valor de hasta 3000 mm/año, valor que está dentro del intervalo registrado en la estación Coca.

### 5.3.2 Evaporación

De lo anotado en hidrología los valores de evaporación anual para un período comprendido entre 1980 a 1985 sería un mínimo de 395.9 mm/año, y un máximo de 988.7 mm/año

Según la referencia de la Figura 5.4 la evaporación tendría un máximo cercano al 1000 mm/año cercano al dato de la estación meteorológica Aeropuerto El Coca. Para efectos de modelo se ha tomado un valor intermedio de evaporación de 671 mm/año.



**Figura 5.4:** Gradiente de la evaporación anual a lo largo de las Provincias de Napo y Orellana. Fuente Andrade, et al, citado por Villacrés (2010)

En este trabajo se parte del valor de evaporación de 988.7 mm/año (INAMHI, 2010). De acuerdo a Andrade, et al (2010), este valor en el área de las provincias de Napo y Orellana puede ser incluso menor, en un rango de

600 mm a 900 mm aproximadamente. Para la convergencia del modelo luego del proceso de calibración se usó un valor de 671 mm/año. Por tanto el valor utilizado en el modelo está dentro del rango anotado.

### **5.3.3 Recarga**

“Para estimar el valor de la recarga no se hicieron mediciones en el campo sino que se asume igual a un porcentaje de las precipitaciones, este porcentaje normalmente se encuentra entre el 5% al 20% dependiendo de diferentes factores como el suelo, la topografía del terreno, y la cobertura del suelo (Fernández Torroba, 2004).

En el modelo, la recarga constituye la cantidad de infiltración de agua en el suelo. Para el modelo se estimó una recarga de 238.35 mm/año del cálculo de la recarga en 4.2.6 se deduce que las recargas en el área de trabajo son de hasta el 7%, de manera semejante a la evaporación, para la convergencia del modelo, luego del proceso de calibración, se usó un valor de 145.8 mm/ año que correspondería a un 4.3% para un valor de precipitación máximo de 3386.4 mm/año y a un 5.4% para un valor de precipitación máximo anual de 2650 mm, que están en el rango permisible de infiltración.





**Figura 5.5: Mapa Vertientes en río Huamayacu**

Si la infiltración corresponde a un 4.3% de la precipitación esto indica que la capa superficial de limos y arcillas no permite el flujo de grandes cantidades de agua desde la superficie hacia el interior del subsuelo, luego el flujo de agua subterránea se da en mayor porcentaje por la capa de arenas limosas que constituye un acuífero confinado que conecta el estero Sapito con el río Huamayacu pasando por debajo del pueblo San Carlos. Este flujo de agua subterránea se puede verificar por la presencia de vertientes en el río, Figura 5.5, flujo de agua subterránea en cavernas debajo

del actual coliseo además de una vertiente con un caudal de hasta 0.055 L/seg en terreno de Sr. Tipán ubicada en 290224E, 9958006 N, atrás de la escuela Crnl Emilio Suarez. Por tanto el flujo de agua subterránea bajo el pueblo es continuo.

### 5.3.4 Análisis de las permeabilidades

Las permeabilidades calculadas mediante ensayos de bombeo para la capa de limos y arenas finas (acuífero confinado), eliminando los valores extremos inferior y superior, están entre el rango de  $3.35 \times 10^{-5}$  m/seg a  $2.88 \times 10^{-7}$  m/seg para la capa de limos y arcillas. Para el acuífero semiconfinado con arenas finas la permeabilidad tiene valores entre  $5.83 \times 10^{-5}$  m/seg a  $2.25 \times 10^{-5}$  m/seg. En la Tabla 4.2 se pueden observar valores de permeabilidad tomados de la bibliografía para diferentes tipos de suelo.

**Tabla 5.2**

**Valores orientativos de K para diferentes suelos.**

**Fuentes (Braja M., 2007), (Ayuso Muñoz & et al, 2004)**

Tipo de suelo	Permeabilidad k (m/seg)		
Grava media a gruesa	1.00E-03		
Arena gruesa a fina	1.00E-01	a	1.00E-03
Arena fina arena limosa	1.00E-03	a	1.00E-05
Limo, limo arcilloso, arcilla limosa	1.00E-04	a	1.00E-06
Arcillas	1.00E-07		

Tomando en cuenta los valores de permeabilidad según las referencias de la tabla 5.2 la capa superior estaría conformado por limos y arcillas limosas y el acuífero confinado por arenas finas lo cual confirma que los valores obtenidos en los ensayos de campo están en un rango apropiado.

### 5.4 DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

El contenido de metales pesados a la fecha en el subsuelo del área urbana de la parroquia San Carlos en lo que respecta tanto en suelo como en agua se anota en el siguiente cuadro:

### 5.4.1 Metales Cd, Ni, Pb, V

Los contenidos de metales pesados en suelo y agua son:

**Tabla 5.3**

**Contenidos máximos en suelo y agua de San Carlos**

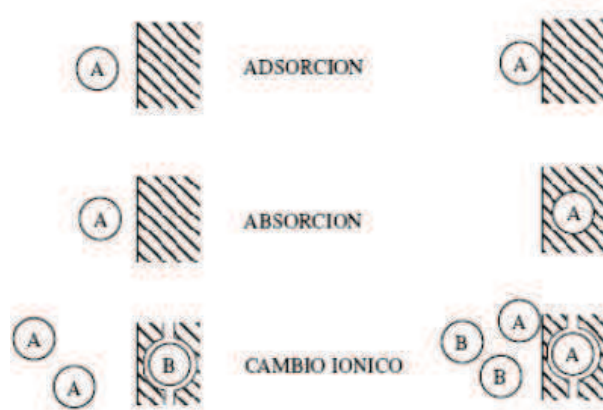
<b>Metal</b>	<b>Suelo mg/L</b>	<b>Agua mg/L</b>
<b>Níquel</b>	0.004 - 2.364	0.090 - 59.093
<b>Cadmio</b>	0.007 - 0.014	0.167 - 0.343
<b>Plomo</b>	0.495 - 0.859	12.382 - 21.475
<b>Vanadio</b>	2.424 - 7.180	0.002 - 0.003

El Ni, Cd, Pb son más abundantes en el agua no así el V. Para las corridas del MODFLOW se han empleado las concentraciones en el suelo debido a que según los tipos de óxidos encontrados una fracción de los metales pesados tienen la tendencia a desplazarse con el flujo de agua subterránea y formar complejos con las arcillas que lógicamente son suelos.

Los valores de contaminación de Ni, Cd, Pb el agua son más altos que en el suelo, luego las plumas de contaminación en agua van a ser de más volumen que en los suelos, pero las primeras van a tener mayor movilidad y cambios con el tiempo.

### 5.5 Comportamiento de plumas de metales pesados Níquel, Cadmio, Plomo, Vanadio

El destino de los metales pesados está controlado por la capacidad de adsorción de los minerales de arcilla, óxidos metálicos y materia orgánica. McBride 1989 citado por (Guzmán Alcalá, 2007) menciona que las arcillas son adsorbentes de los metales pesados. En general pueden ser adsorbidos, absorbidos o formar parte de un intercambio iónico en el medio de transporte, ver Figura 5.6.



**Figura 5.6: Diferentes procesos de sorción, Appelo and Postma, 1993, citado por (Agua.uji.es, 2010)**

Los procesos de movilidad de los metales pesados se ven afectados por el pH del medio. La mayoría de los metales tienden a estar disponibles cuando el pH es ácido. En pH moderadamente altos precipitan como hidróxidos y en medios muy alcalinos pueden pasar a la disolución de suelo como hidroxicomplejos (Guzmán Alcalá, 2007).

También los cambios en la carga superficial de los componentes del suelo afectan al grado de adsorción metálica en los medios sólidos, ya que las reacciones de adsorción están ligadas a la carga superficial negativa del adsorbente Jenne, 1968 citado por (Guzmán Alcalá, 2007).

### 5.5.1 Características químicas del suelo

Según el análisis de minerales presentes en el acuífero del área urbana de San Carlos y con un pH = 5.8 de los suelos están conformados por:

Los óxidos de SiO<sub>2</sub> (50.89 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (43.66%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10.12%).

Teóricamente la distribución de óxidos de hierro hidratados a pH = 5.8 es  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  con un 76.31%,  $\text{Fe}(\text{OH})$  con un 23.65% y con un porcentaje muy bajo  $\text{FeO}^-$  con un 0.023%. Ver Figura 5.8.

En estas condiciones de suelo, la adsorción de los metales pesados ocurre de dos formas primero en de las arcillas existentes (caolinita) y segundo en los minerales de hierro.

### 5.5.2 Adsorción en las arcillas

Entre las propiedades físicas de las arcillas están: el tamaño de las partículas (menor a 0.002 mm), la elevada superficie específica (caolinita 7 a 30  $\text{m}^2/\text{g}$ ), y la carga eléctrica negativa. El origen de la carga se debe a adsorción de aniones o cationes especialmente en los bordes de las arcillas y a la ionización de la superficie en los bordes de los cristales. La carga eléctrica negativa es la que determina la forma de interacción entre las láminas de arcilla y su capacidad de adsorción catiónica (González de Vallejo, 2006) “esto determina la capacidad del suelo como depurador natural al permitir la retención elementos contaminantes. En las arcillas, además de interactuar en su superficie, los iones pueden penetrar en las láminas del mineral caolín” (Doronsoro Fernández, 2013) . Ver Figura 5.7.

La caolinita puede adsorber  $\text{Pb}^{2+}$  en un rango de 0.12 hasta 1.41 mg/g (Srvastova et al, 1989) y el Cd hasta 0.32 mg/g (Chantawong et al, 2000) citados por (Guzmán Alcalá, 2007) y los suelos con altos contenidos de Fe y Mn adsorben en menor extensión al Ni (Guzmán Alcalá, 2007)

La caolinita tiene una composición  $\text{Al}_4 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$  con una capa tetrahédrica ocupada por  $\text{Si}^{4+}$  y una octahédrica ocupada por  $\text{Al}^{3+}$  con espesor de 7 Å (González de Vallejo, 2006). Por las características de carga eléctrica y de configuración interlaminar la caolinita puede adsorber Ni, Cd, Pb. (Ver Figura 5.7)

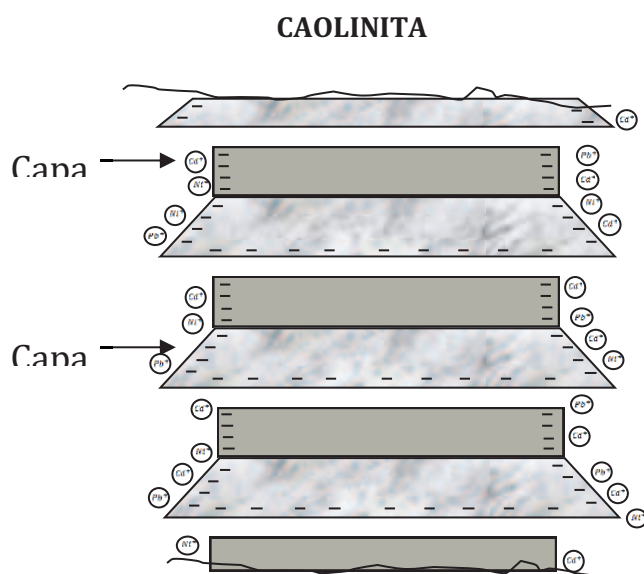


Figura 5.7: Iones entre las láminas de arcillas. Fuente (Doronsoro Fernández, 2013)

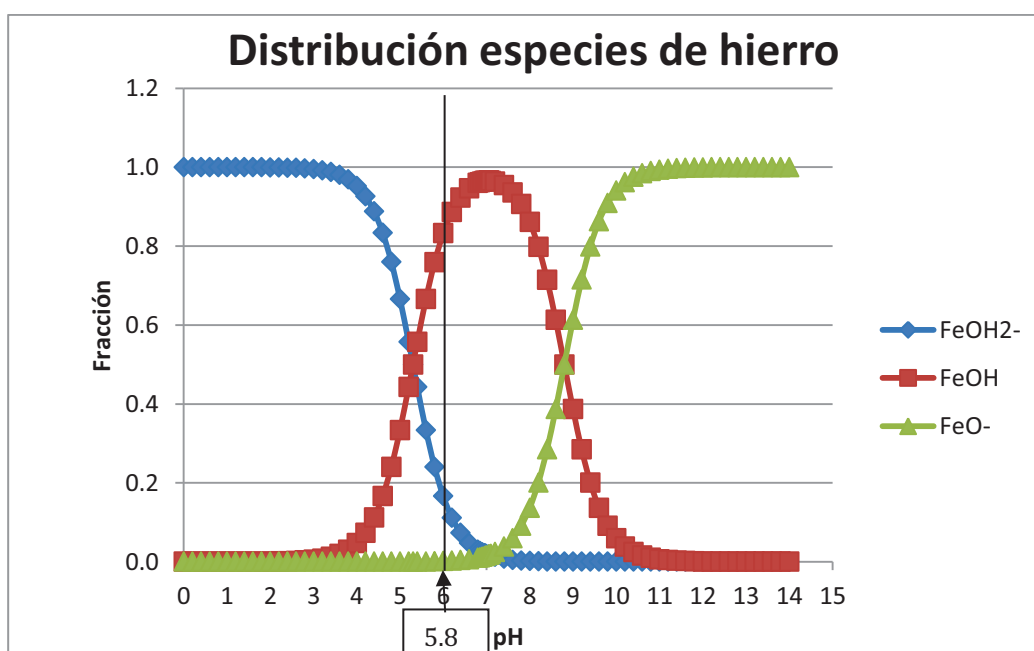


Figura 5.8: Distribución óxidos de hierro amorfos. Ubicación óxidos amorfos para un valor de pH=5.8 del subsuelo área urbana San Carlos.

### 5.5.3 Adsorción en los minerales de hierro

Según las curvas de especiación del hierro, Figura 5.8, a pH>5.5 el grupo funcional predominante de los óxidos de hierro hidratados FeOH. Si en los suelos de San Carlos el pH=5.8 entonces los metales pesados son inmovilizados por interacción ácido – base de Lewis formando complejos que es más fuerte que la electrostática. Sin embargo en función de la electronegatividad se tiene una adsorción de mayor a menor según el siguiente orden:

**Tabla 5.4**

**Electronegatividades Plomo, Cadmio, Níquel, vanadio**

Metal	Pb	>	Ni	>	Cd	>	V
Electronegatividad	2.33	>	1.91	>	1.69	>	1.6
Adsorción según electronegatividad	Total		Media		Parcial		Nula

Entonces, la adsorción de los metales pesados ocurre mediante la formación de complejos estables con la liberación de H<sup>+</sup>, de la siguiente forma:

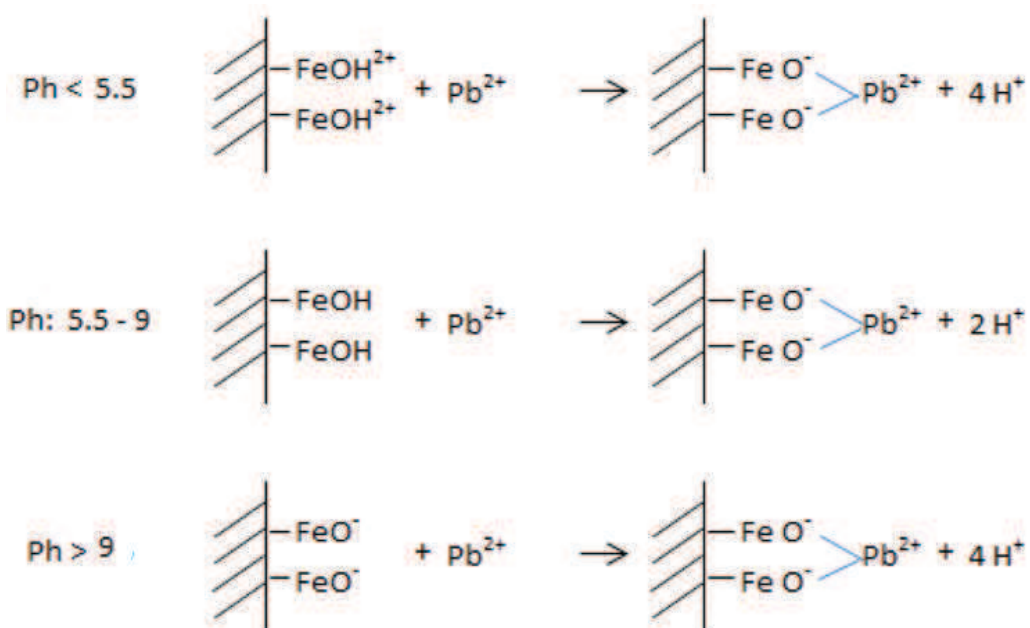
**Para la pluma del Plomo:**

$2\text{Fe}(\text{OH}) + \text{Pb}^{2+} \rightarrow (\text{FeO})_2\text{Pb} + 2\text{H}^+$  con captura total del 83% de plomo a pH=5.8 el plomo está en un límite en el que al igual que puede ser adsorbido hasta un 83%, ver Figura 5.10. Además a pH básicos el plomo precipita como hidróxido de Pb y ayudado por su alto peso específico penetra a mayores profundidades en el acuífero, manteniéndose en el área donde inició el foco de contaminación. Como se observa en las plumas de contaminación en el estero. Una pequeña cantidad se dispersa desde el estero Sapito hacia el río Huamayacu. Esta condición en un tiempo de hasta 50 años. Como resultado el plomo, en general, tiene una movilidad muy baja

y se mantiene en el lugar donde inició el foco de contaminación, es decir, el estero Sapito.

Además el Pb por tener un radio atómico muy pequeño y electronegatividad elevada atrae más moléculas de agua y transforma en un catión de radio hidratado “muy grande” que en consecuencia se mueve muy lentamente en el agua.

En esquema genérico se puede observar las condiciones en las que las especies de hierro forman complejos con el plomo. A un pH de 5.8 el plomo forma complejos con  $\text{FeO}^-$  con desprendimiento de  $2\text{H}^+$



**Figura 5.9. Esquema genérico plomo formando complejos con especies de hierro**

**Para la pluma del Níquel:**

$2\text{Fe}(\text{OH})^- + \text{Ni}^+ \rightarrow (\text{FeO})_2^- \text{Ni}^+ + 2\text{H}^+$ . El níquel es capturado o adsorbido por los óxidos de hierro en un 5% aproximadamente. El níquel tiene mayor movilidad que el Pb, por lo que la pluma se extiende bajo toda el área



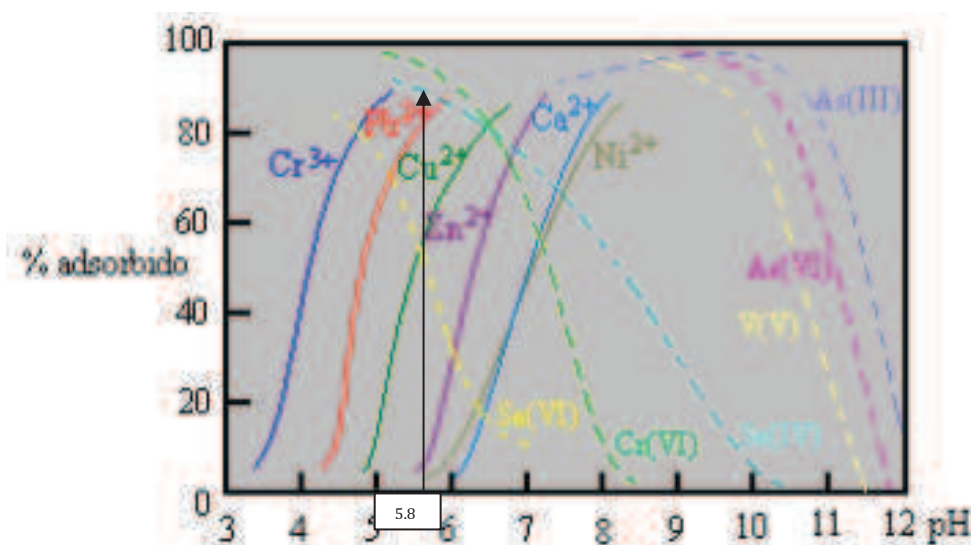
urbana. Al final del período de análisis 50 años, termina en el río Huamayacu.

**Para la pluma del Cadmio:**

$2\text{Fe}(\text{OH})^- + \text{Cd}^+ \rightarrow (\text{FeO})_2\text{Cd}^+ + 2\text{H}^+$ . La captura del cadmio es parcial. El porcentaje de adsorción es de hasta el 15% aproximado.

En las plumas de cadmio se observa que este metal pesado tiene más movilidad que el níquel en todo el subsuelo del área urbana de San Carlos. Al final del período de análisis, 50 años, la concentración de Cd en las vertientes del río Huamayacu aumenta.

Por tanto la captura de las especies plomo, níquel, cadmio ocurre debido a que estos se encuentran disponibles a pH menores que 7.



**Figura 5.10: Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales y oxianiones metálicos sobre hidróxidos de hierro amorfo (Manziona y Merrill, 1989)**

### **Para la pluma del Vanadio:**

Según el gráfico de Manzini y Merrill (1989) citado por (Cumbal, 2013) el Vanadio a pH=5.8 no es adsorbido por el hidróxido de hierro amorfo ya que a medida que aumenta el pH los óxidos de hierro se vuelven negativos en su superficie y también el  $V^{+5}$  forma vanadatos (anión).

#### **5.5.4 Efectos de la electronegatividad**

Según la escala de Pauling (Tabla 5.4) la electronegatividad es la propiedad que tiene un átomo (elemento) de atraer electrones, así el  $Pb^{2+}$  puede atraer a los electrones libres de  $FeO^-$  y  $FeOH$  por la fuerza de interacción ácido base de Lewis:

Siendo así el plomo tiene la mayor capacidad de atraer electrones  $e_s^-$  desde los óxidos metálicos ( $FeOH_2^+$ ,  $FeOH$ ,  $FeO^-$ ) por lo tanto permanece bien adherido a los materiales sólidos que tienen óxidos metálicos, entonces le siguen en fuerza de atracción el níquel, el cadmio y el vanadio, en ese orden. Por ello la pluma de contaminación del plomo se circunscribe prácticamente al sitio de foco de contaminación debido a que permanece adherido a los materiales sólidos, que en el caso de los suelos de San Carlos son ricos en hierro y aluminio (forman óxidos de Fe o de Al).

Según datos de campo la Tabla 5.5 los valores del potencial redox alcanzan hasta 204.6 mV, “esto evidencia la presencia del oxígeno disuelto de manera que el Fe y el Al van a adquirir el estado de oxidación de  $Fe^{3+}$  y  $Al^{3+}$  y este estado facilita la formación de óxidos hidratados Fe o Al, los que a su vez van a formar grupos funcionales:  $FeOH_2^+$ ,  $FeOH$ ,  $FeO^-$  a pH de 5.72 a 8.3 y que estos grupos originan la formación de complejos de esfera interna” (Cumbal, 2013).

**Tabla 5.5****Parámetros aguas subterráneas en acuífero área urbana Parroquia San Carlos. Equipo utilizado: Multiparamétrico MX300**

POZO	Temperatura agua (°)	pH agua	Conductividad (uS/cm)	Total sólidos disueltos (mg/L)	Potencial redox (mV)	Rel mV	Prof Nivel Freático (m)
5D	28.5	8.03	149.6	75.5	172.5	200	4.5
P9	26.7	6.36	229.6	105.1	192.2	196.2	7.69
P8	28.9	6.77	129.2	63.8	161.6	163.5	4.59
P6	27.7	6.5	149	73.8	204.6	203.7	7.92
P12	27.9	6.18	94.2	46.1	160.8	192.6	8.51
P11	27.8	6.76	171.2	85	185.3	181.6	1.06
P2	28.1	5.72	173.5	84.8	194.4	195.2	9.29
P28	26.6	7.18	312	152.9	125.2	130	1
POZO JUNTA	32.7	7.3	221	109.6	176.3	180.5	24

El vanadio es el metal de la lista que menos electronegatividad tiene por tanto menor fuerza de interacción de Lewis. Los vanadatos para potenciales redox Pot < 15 mV o para oxígeno disuelto OD < 0.5 mg mantienen condiciones anaerobias con el vanadio como V(IV), del cuadro anterior se confirma que no existe una condición anaeróbica por los valores de potencial redox entre 161.6 mV a 204.6 mV por la cantidad de oxígeno disuelto existente. Luego el vanadio está para éstas condiciones como V(V) en estado de mayor oxidación formando un vanadato VO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

### 5.5.5 Constantes de solubilidad

En la siguiente Tabla 5.6 Se anotan los valores de las constantes de solubilidad K<sub>ps</sub> para los hidróxidos que forman los metales pesados: plomo, cadmio y níquel.

**Tabla 5.6****Constantes de solubilidad kps. Fuente (slideshare, 2013)**

Hidróxido	Kps
Pb(OH) <sub>2</sub>	1.2x10 <sup>-15</sup>
Cd(OH) <sub>2</sub>	1.2x10 <sup>-14</sup>
Ni(OH) <sub>2</sub>	1.2x10 <sup>-14</sup>

El plomo forma el hidróxido más estable consecuentemente, el precipitado permanece retenido en el suelo. Este fenómeno igualmente contribuye para que la pluma del plomo sea muy pequeña y no se extienda a los costados más bien se difunde hacia el fondo del suelo en tiempos de hasta 50 años.

El vanadio al estar como vanadato VO<sub>4</sub> se encuentra en el petróleo formando estructuras tipo porfirinas (Wikipedia, Vanadio wikipedia enciclopedia libre, 2013). Este compuesto forma fácilmente complejos con oxígeno y nitrógeno... y puesto que el pH entre 6 a 8 de la mayoría de las aguas naturales (incluye subterráneas), la forma más común es H<sub>2</sub>VO<sub>4</sub><sup>-</sup>, oxoanión monovalente de vanadio, vanadato (Villacreses, 2012).

**Tabla 5.7****Constantes de disociación ácida para especies de vanadio.****Fuente. [http//es](http://es). (Wikipedia, 2013)**

Equilibrio	Valor de pK <sub>a</sub>
1) [VO <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub> ] <sup>+</sup> ⇌ H <sub>3</sub> VO <sub>4</sub> + H <sup>+</sup> + 2H <sub>2</sub> O	pK <sub>a1</sub> = 4.2
2) H <sub>3</sub> VO <sub>4</sub> ⇌ H <sub>2</sub> VO <sub>4</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup>	pK <sub>a2</sub> = 2.60
3) H <sub>2</sub> VO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ⇌ HVO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + H <sup>+</sup>	pK <sub>a3</sub> = 7.92
4) HVO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ⇌ VO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> + H <sup>+</sup>	pK <sub>a4</sub> = 13.27

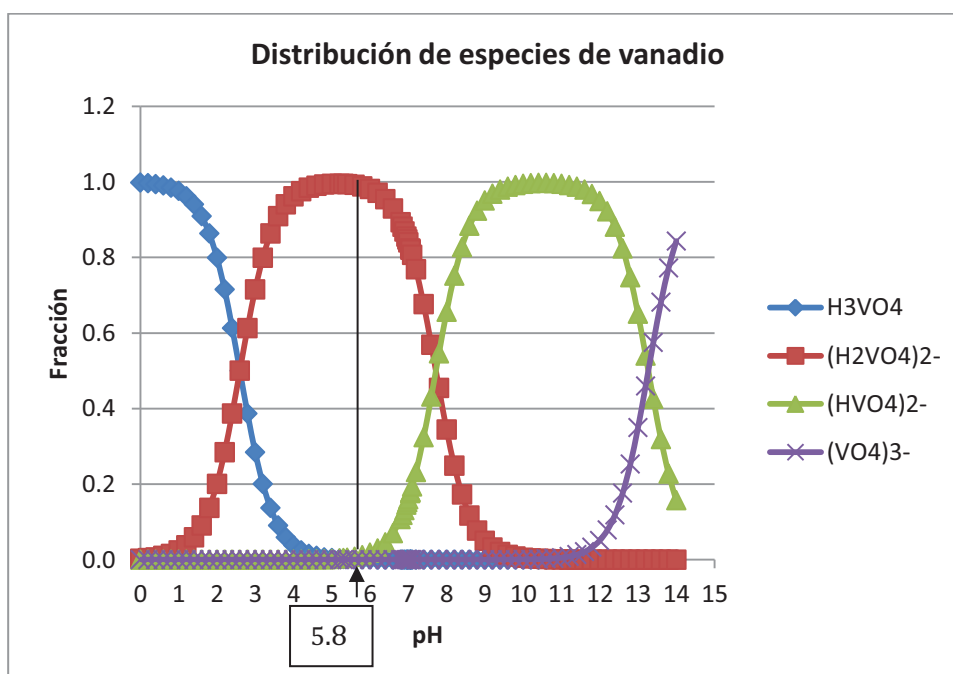
El ion vanadato surge del equilibrio de la ecuación 1) al tener en el acuífero ácido vanádico con presencia del ión vanadato (H<sub>2</sub>VO<sub>4</sub>)<sup>-</sup> más un un

protón  $H^+$ , al existir oxígeno disuelto y un potencial redox entre 170mV a 210mV en los diferentes pozos de prospección, estas condiciones de oxidación hacen que el vanadio en forma de ion vanadato y bivanadato sean solubles al pH encontrado en los pozos (5.72 -8.03) ya que los pKa son 2.6 y 7.92 respectivamente.

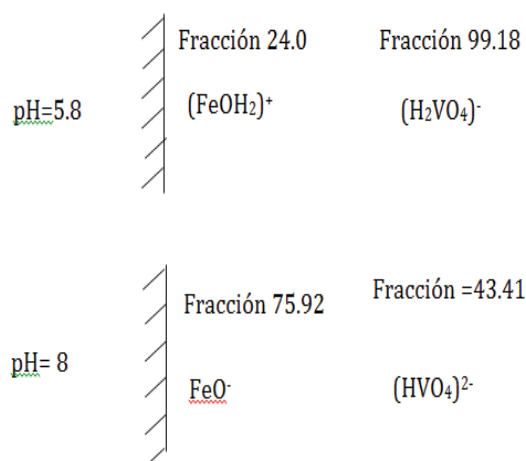
Entonces si no existen superficies con carga positiva para neutralizar la carga del ion vanadio, éste permanece temporalmente libre y así se transporta en el acuífero formando una pluma de contaminación.

De la distribución de especies de óxidos de hierro Figura 5.8 para un pH = 5.8 se tiene que  $FeOH_2^+$  con 75.9% y  $Fe(OH)$  con 24%.

De la distribución de especies del vanadio Figura 5.11 para un pH = 5.8 se estima que el  $(H_2VO_4)^-$  con 99.18% de fracción y el  $(HVO_4)^{2-}$  en muy baja proporción 0.0075%. Estas fracciones confirman el hecho de que el vanadio no es fijado en su totalidad a los sólidos y que migra en el acuífero.



**Figura 5.11: Distribución de especies de vanadio. Ubicación de especies de vanadio para un valor de pH = 5.8 del subsuelo área urbana San Carlos**



**Figura 5.12: Esquema genérico para pH=5.8 de especies de hierro y vanadio**

En la Figura 5.12 el esquema genérico de acuerdo a dos condiciones de pH = 5.8 y una extrema pH = 8, condición en la que las especies de los óxidos de hierro tienen carga negativa; lo cual hace que repelan a las del vanadio y el vanadio forme una pluma más grande en el subsuelo.

### 5.6 Resultados de las plumas de contaminación

La pluma de contaminación es un mapa tridimensional que se utiliza para modelar la forma que adquiere la difusión y dispersión del componente que se investiga en el agua subterránea de un sitio (Cumbal, 2013)

La investigación se centra en los contaminantes que son cualquier sustancia añadida a la atmósfera, suelo o agua y que producen un efecto negativo apreciable sobre las personas o el medio (monografías.com, 2013). En este estudio los contaminantes provenientes de residuos de explotación petrolera son los metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Vanadio.

El estero Sapito sirvió durante mucho tiempo como canal de desalojo principalmente de aguas de formación desde los pozos petroleros del campo Sacha Sur (según versión de los habitantes de San Carlos), luego obviamente es el principal foco contaminante desde donde se distribuyen los

contaminantes Cd, Ni, Pb, V principalmente en función del tiempo, permeabilidad, porosidad, concentración inicial y condiciones de frontera hacia el acuífero ubicado debajo del área urbana del pueblo.

En el Capítulo 3, Parte 3 se muestra la variación de las plumas de contaminación para metales Cd, Ni, Pb y V. Se muestra la Visualización de las plumas de contaminación considerando tiempos de control de 365 días (1 año), 18250 días (5 años), 3650 días (10 años), 9125 días (25 años), 18250 días (50 años). Para Ni y Pb se muestra también plumas a 14600 días (40 años) debido a que para menor tiempo no se observa un movimiento significativo de la pluma.

Partiendo de las concentraciones iniciales a continuación se hace un seguimiento de los resultados del modelo de flujo de contaminantes Cd, Ni, Pb, V para cada uno de los tiempos de control.

### **5.6.1 Pluma del Cadmio**

Cadmio hasta 1 año se extiende en todo el acuífero superior con concentración de 0.32 mg/L y se observan concentraciones mayores en rango de 0.48 a 0.57 mg/lit en el estero Sapito y en el río Huamayacu

A los 5 años el Cadmio desciende desde el acuífero superior al acuífero inferior en concentración en una concentración de 0.34 mg/L mientras que en los cauces, río y estero, alcanza 0.93 mg/L. En el cauce del río pero a mayor profundidad tiene una concentración de 0.4669 g/Lit en el acuífero superior.

A los 10 años se inicia una limpieza del Cadmio por flujo natural en dirección hacia el estero y hacia el río alcanzando una concentración de 0.25 mg/L, pero aumenta la concentración en ambos cauces, río y estero, hasta 1.25 mg/L. El acuífero superior tiene una concentración de 0.6 mg/Lit.

A los 25 años aumenta una la limpieza natural hacia los cauces por tanto aumenta la concentración en los mismos 2.75 mg/Lit. El acuífero superior tiene una concentración, bajo el cauce de 1.27 mg/Lit que va variando, para disminuir, hacia las riberas entre valores de 0.866 mg/L, 0.46 mg/L, 0.056 mg/L.

A los 50 años es decir en época actual, siempre considerando que el tiempo de variación en el modelo es de 0 (cero) a 50 (cincuenta) años, se concentra únicamente en los cauces, la mayor concentración se da en el leve del río en profundidad en el acuífero superior con valores que varían entre 6.96 mg/L, 3.13 mg/Lot, 2.089 mg/L, 0.00271 mg/L para disminuir hacia las orillas y hacia el fondo siempre en el cauce.

### **5.6.2 Pluma del Níquel**

El Níquel hasta los 25 años no muestra una pluma de contaminación. A los 40 años aparece una concentración de hasta 357.33 mg/L en el cauce del río al N-W del área urbana y a los 50 años aparece una pluma con concentraciones de 285.78 mg/L a 476.20 mg/L aguas abajo hacia el S-W del área urbana.

### **5.6.3 Pluma de Plomo**

El Plomo tiene un comportamiento diferente, se observa que baja por gravedad y no necesariamente se transporta a través del acuífero desde el foco de contaminación ubicado, según condiciones reales y en el modelo, en el estero Sapito.

En un tiempo de 1 año a 50 años hay una variación entre 2.34 mg/L y 2.9 mg/L en los acuíferos, no así en el foco de contaminación que en período de 1 a 50 años varía una concentración de 16 mg/L hasta 19.9815 mg/Lit

En un tiempo de 40 años aparece una pluma de contaminación aguas arriba y aguas abajo en el leve río Huamayacu.



En los cauces, entre los 40 años y 50 años la concentración aumenta hacia el fondo de los cauces desde 2.64 mg/L a 2.9 mg/L hacia el fondo. Hacia el acuífero superficial y en el foco de contaminación (estero Sapito) la concentración está en el rango 18.037 mg/L hasta 91.9815 mg/Lit es decir aumenta.

#### **5.6.4 Pluma del Vanadio**

El Vanadio desde el primer año se reparte en el acuífero superior con una concentración de 0.935 mg/L en los acuíferos y en los cauces de 1.253 mg/L.

A los 5 años ya no aparece en el acuífero superior pero baja al acuífero semiconfinado con una concentración de 0.9327 mg/L. Aumenta la concentración en los cauces a 2.578 mg/L, hacia el interior del cauce llega a 1.285 mg/L y disminuye hacia el fondo.

A los 10 años se inicia una limpieza natural del Vanadio en dirección de los cauces es decir hacia el río y hacia el estero a la vez que aumenta la concentración en los mismos 3.296 mg/L en el acuífero superficial, la concentración disminuye en profundidad hasta 1.592 mg/L.

A los 25 años ya no se observa Vanadio bajo el área urbana, no así en los cauces. En el leve del río alcanza una mayor concentración 7.255 mg/L siempre disminuyendo hacia las orillas 3.346 mg/L y en el fondo 1.215 mg/L.

A los 50 años de manera semejante ya no se observa Vanadio bajo el área urbana pero sigue aumentando en los cauces 18.315 mg/L, hacia las orillas 8.245 mg/L y en el fondo 2.752 mg/L..

**Tabla 5.8****Concentraciones finales según modelo a un tiempo de 50 años**

<b>Metal</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tiempo</b> <b>(años)</b>	<b>Sitio</b>	<b>Resultados</b> <b>Modelo</b> <b>Acuífero</b> <b>confinado</b>
<b>Cd</b>	mg/L	50	Leve río	6.96
<b>Ni</b>	mg/L	50	Río Huamayacu S-W de San Carlos	476.2
<b>Pb</b>	mg/L	50	Estero Sapito Cauces, río	19.985
<b>V</b>	mg/L	50	Huamayacu y estero Sapito	18.315

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

El modelo de flujo representa las plumas de contaminación de Ni, Cd, Pb, V en un tiempo de hasta 50 años.

Cada metal pesado tiene su propio comportamiento. Se mantiene un foco contaminante con predominio de Pb en el estero. En 50 años el área más contaminada corresponde al río Huamayacu, y al estero , ambas afectan al área urbana de la parroquia San Carlos

La respuesta de porqué las plumas de Cd, Pb, Ni se extiende se deben a:

De acuerdo a los estudios realizados el suelo de San Carlos contiene grandes cantidades de silicatos, Fe, Al.

Los silicatos provienen del suelo arcilloso, pero las arcillas no forman compuestos minerales estables o fuertemente ligados por lo tanto no retienen a los metales pesados éstos puedan transportarse por agua subterránea formando plumas.

En cambio los óxidos hidratados de Fe y Al sí forman compuestos ligados fuertemente, un ejemplo de estos son la hematitas (óxido de hierro). Los óxidos se comportan como ácidos débiles y sus grupos reactivos pueden repeler o capturar totalmente a los metales pesados.

El flujo de Pb y Ni depende también de la electronegatividad. Por ejemplo la diferencia de la electronegatividad entre Pb y Fe es 0.55 y origina ligandos más estables pero con el tiempo (años) puede ocurrir lixiviación y son arrastrados por el agua subterránea, por esto se encuentran

concentraciones elevadas de metales pesados en los sedimentos de las vertientes del río Huamayacu

El Pb se inmoviliza más fuertemente que el Ni porque la interacción ácido - base de Lewis es más fuerte en el Pb debido a su mayor electronegatividad.

Las plumas de contaminación muestran que las mayores concentraciones en un período de hasta 50 años son transportadas a los cauces del río Huamayacu y del estero Sapito; esto se evidencia con los reportes de ESPE del 2010, respecto al análisis de muestras de suelo recuperadas del cauce del río. Notar que las concentraciones de Níquel, Cadmio, Plomo y Vanadio son muy altos.

#### **Tabla6.1**

**Análisis de metales para dos muestras Río Huamayacu, San Carlos.**

**Fuente: CEINCI ESPE, 2009.**

Rotulación muestra	290008E 9958101 N	290219 E 9957904 N	Metodo adaptado de Referencia
Fecha de muestreo	05-jun-09	05-jun-09	
<b>Metales:</b>			
Aluminio %	1.8	1.8	EPA 6020A
Antimonio mg/kg	<0.50	<0.50	EPA 6020A
Arsénico mg/kg	0.47	0.99	EPA 6020A
Bario mg/kg	210	180	EPA 6020A
Boro mg/kg	20	20	EPA 6020A
Cadmio mg/kg	0.17	0.17	EPA 6020A
Calcio %	0.44	0.40	EPA 6020A
Cromo mg/kg	13	6.8	EPA 6020A
Cobalto mg/kg	5.3	9.5	EPA 6020A
Cobre mg/kg	28	25	EPA 6020A
Hierro %	0.89	1.2	EPA 6020A
Magnesio %	0.13	0.37	EPA 6020A
Manganeso mg/kg	160	290	EPA 6020A
Mercurio mg/kg	<0.10	<0.10	EPA 6020A
Molibdeno mg/kg	0.14	0.31	EPA 6020A
Niquel mg/kg	7.8	10	EPA 6020A
Fósforo %	0.09	0.10	EPA 6020A
Potasio %	0.03	0.03	EPA 6020A
Selenio mg/kg	0.15	0.14	EPA 6020A
Plata mg/kg	<0.10	<0.10	EPA 6020A
Plomo mg/kg	5.5	5.0	EPA 6020A
Sodio %	0.08	0.07	EPA 6020A
Estroncio mg/kg	84	72	EPA 6020A
Azufre %	0.05	0.05	EPA 6020A
Talio mg/kg	<0.10	<0.10	EPA 6020A
Titanio %	0.10	0.08	EPA 6020A
Uranio mg/kg	0.65	0.63	EPA 6020A
Vanadio mg/kg	48	46	EPA 6020A
Zinc mg/kg	52	28	EPA 6020A

## 6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda lo siguiente:

Un estudio de los coeficientes de dispersión Kd en las condiciones naturales de los suelos del oriente ecuatoriano para adaptarlos a modelos de flujo.

Realizar estudios de contaminación por metales pesado en los causes de los ríos, ya que el flujo de los acuíferos con cargas de agua regionales y escurrimiento y filtraciones también es desde la superficie.

Estudiar plumas de contaminación con Hg y Ti que durante esta investigación fueron encontrados pero que no se les incluye por no estar en

el plan inicial de la investigación. Además de investigar la presencia de carbonatos y sulfatos en los suelos.

Realizar estudios para determinar el método adecuado de remediación para eliminación de metales pesados en las condiciones actuales del acuífero, como también remediación de del río Huamayacu y Estero Sapito.

## CAPÍTULO VII

### LITERATURA CITADA

- Agua.uji.es. (12 de No de 2010). *Procesos de adsorción Lección 17*. Obtenido de agua.uji.es: [www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf](http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf)
- Allison, J. D., & Allison, T. L. (July 2005). Partition Coefficients For Metals In Surface Water, Soil, and Waste. *US EPA; Office of Reserch and Develoment*, 93.
- Anderson, M., & Woessner, W. (1992). *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego Californi, EEUU: Academic Press, Inc.
- Ayer, E., & Palmer , P. (2006). ¿ Qué es una pluma? *Arcadis G&M Inc*.
- Ayuso Muñoz, J., & et al. (2004). *Fundamentos de ingeniería de Cimentaciones*. Córdoba: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- Bedient, P. B., Rifai, H. S., & Newell, C. J. (1999). *Ground Water Contamination Transport and Remediation*. Michigan: Prentice - Hall.
- Braja M., D. (2007). *Principles of Geotechnical Engineering*. Toronto: Thomson.
- Cumbal, L. (2013). *Contaminación de Suelos*. Sangolquí: Maestría Siatemas de Gestión Ambiental, ESPE Ecuador.

- Doronsoro Fernández, C. F. (16 de 07 de 2013). *Edafología.net*. Obtenido de <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema05/ccc.htm>
- EPA. (August, 1999). *UNDERSTANDING VARIATION IN PARTITION COEFFICIENT, Kd, VALUES, Volume 1: The Kd Model, Methods of Measurement, and Application of Chemical Reaction Codes*. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA USA. (2003 Abril). EPAS's Composite Model for Leachete Migration With Transformation Products (EPACMTP). Parameters/Data Background Document. *EPA United Environmental Protection Agency*, 362.
- EPA, U. (1999a). UNDERSTANDING VARIATION IN PARTITION COEFFICIENT, Kd, VALUES Volumen I: The kd Model, Methods of Measurement, and Application of Chemical Reaction Codes. *Agency, United States Environmental Protection*, 212.
- EPA, U. (1999b). UNDERSTANDING VARIATION IN PARTITION COEFFICIENT, kd, VALUES Volume II: Review of Geochemistry and Available kd Values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium, Tritium (3H), and Uranium. *Agency, United States Environmental Protection*, 341.
- EPA, U. (2004). Understanding Variation in Partition Coefficient, Kd, Values, Vol III. review of Geochemistry and Available Kd Values for Americium, Arsenic, Curium, Lanthanum, Neptunium, Radium, and Technetium. *United States Environmental Protection Agency*, 188.
- Evan, K., & Peter, L. (2006). ¿ Qué es la pluma y por qué debe importarme? *Arcadis G & M Inc*.
- Fernández Torroba, M. Á. (2004). *Estudio y modelización de la contaminación del acuífero de Najerilla. aplicación de la microextracción en fase sólida para determinación de los contaminantes*. La Rioja: Tesis doctoral, Universidad de la Rioja, Servicio de Publicaciones.
- G., Monsalve. (2009). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- González de Vallejo, L. I. (2006). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Greenberg, A. E., Clesceri, L. S., & Eaton, A. D. (1992). *Standard Methods, for the Examination of water and waste water*. Washington, DC: American Public Health Association, 1015 Fifteenth Street, NW.
- Guzmán Alcalá, M. (2007). *la Contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- INAMHI. (2012). *Anuario Meteorológico INAMHI*. Quito: Instituto nacional de meteorología e hidrología.
- INAMHI, I. N. (2010). *Estaciones meteorológicas e hidrológicas operativas y series de precipitación y caudales mensuales*. Quito: INAMHI.
- INEMIN. (1987). Mapa Geológico de las Provincias orientales del Ecuador. Escala 1:250000. *Boletín Explicativo. Ministerio de Energía y Minas, Instituto Ecuatoriano de Minería*, 27 - 28 .
- INEMIN;. (1989). *Mapa Geológico de las Provincias Orientales 1:250000. Boletín explicativo*. Quito: Ministerio de Energía y Minas, Instituto Ecuatoriano de Minería.
- Jerry D. Allison, T. L. (July 2005). Partition Coefficients for Metal in Surface Water, Soil, and Waste. . *U.S. EPA, EPA/600/R-05/074*, 93.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2002). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
- Lenntech. (15 de Octubre de 2010). *Water Treatment Solutions*. Obtenido de Water Treatment Solutions: <http://www.lenntech.com/espanol/home-espe.htm>
- monografías.com. (19 de 10 de 2013). *monografías.com*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos12/conta/conta.shtml>

- Monsalve Sáenz, G. (2009). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Peralta, S. (2007). *levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Uramaco*. Uramaco, Estado Falco, Venezuela: Universida Simón Bolívar.
- Sánchez Pachón, C. (10 de 02 de 2003). Principios Actuales en la Caracterización de suelos Contaminados en los Estados Unidos. *IGME, Madrid*, 201 - 206. Obtenido de [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2\\_th/lib106/pdf/lib106/in\\_6.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_th/lib106/pdf/lib106/in_6.pdf)
- Sanchez San Roman, F. J. (2010). *Hidrología*. Salamanca: <http://web.ususl.es/javisan/hidra>.
- Sanders, I. (1998). *A manual of field hydrogeology*. Michigan: Prentice Hall.
- Sanz Pérez, E., & Menéndez Pidal, I. (2014). *Hidráulica Subterránea*. Madrid: IBERGARCETA PUBLICACIONES.
- Schlumberger. (2005). *User's manual, Visual MODFLOW Premium v.4.3. Dynamic Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling Software*. Ontario: Schlumberger Water Services.
- Schlumberger. (2009). *The Waterloo Training Course Series. Applied Grandwater Flow & Contaminant Trnasport Modeling using MODFLOW-2000, MODPATH, Zonebudget, MT3D & WinPEST*. Costa Rica: Schlumberge Water Services.
- Schlumberger Water, s. (2009). Ejercicio de laboratorio paravisual MODFLOW 2009.1. Intro Flujo de agua subterránea y transporte de contaminantes. *Chen West, the flow model, the transport model*, 85.
- slideshare. (05 de 08 de 2013). *Kps hidróxidos metales pesados*. Obtenido de <http://slideshare.net/adriandsierra/tablas-de-constantas-de-productos-de-solubilidad>
- Tobar Martín, R. (17 de 08 de 2011). *Desarrollo y validación de una herramienta de cálculo de riesgo de seulos y aguas contaminados*. Obtenido de Ruht tobar Martin: [http://www.researchgate.net/researcher/36716435\\_Ruth\\_Tobar\\_Martin](http://www.researchgate.net/researcher/36716435_Ruth_Tobar_Martin)
- Villacreses, L. (2012). *Evaluación del vanadio como indicador de contaminación de origen petrolero*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.
- Wikipedia. (17 de 08 de 2013). Obtenido de [wikipedia.org/wiki/constante\\_de\\_disocia%C3%83n\\_%A1cida](http://wikipedia.org/wiki/constante_de_disocia%C3%83n_%A1cida). 2013-08-17
- Wikipedia. (05 de 08 de 2013). *Vanadio wikipedia encilopedia libre*. Obtenido de <http://es.wikipedia.org/wilki/Vanadio.2013-08-05>
- Zona de ingeniería apuntes*. (08 de 06 de 2012). Obtenido de <http://www.entradas.zonaingenieria.com/2012/05/aforo-con-molinete-o-correntometro.htm>