

MODELAMIENTO DEL FLUJO Y TRANSPORTE
DE METALES PESADOS EN EL ACUÍFERO
SUPERIOR DE LA ZONA URBANA DE LA
PARROQUIA DE SAN CARLOS, PROVINCIA DE
ORELLANA A TRAVÉS DE LA CARACTERIZACIÓN
IN SITU DEL SUBSUELO Y DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS SOMERAS

HUGO BONIFAZ

ANTECEDENTES

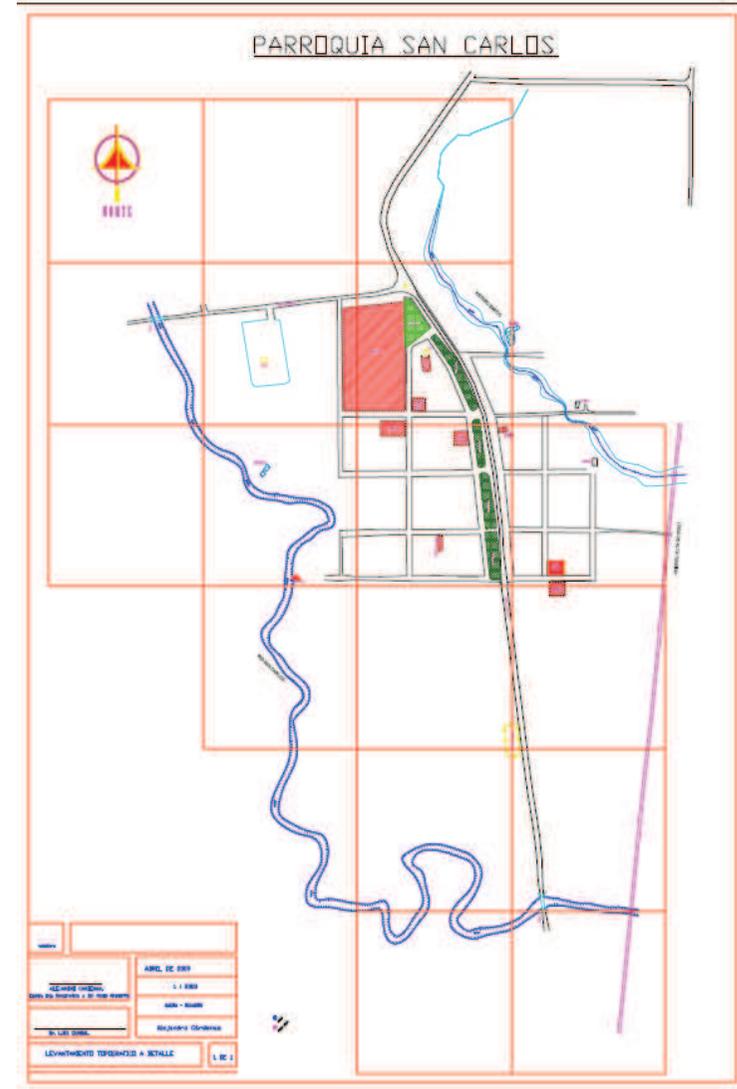
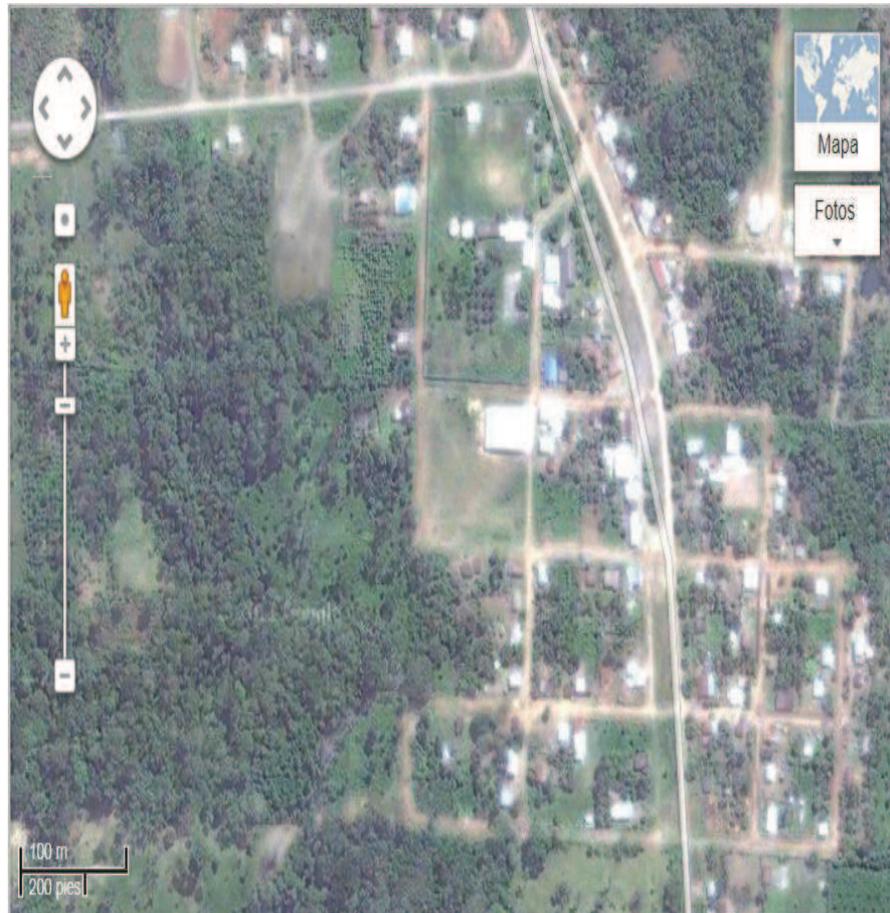
- Realizada caracterización del subsuelo en el área urbana. Tipo de suelos, porosidad, permeabilidad
- Estratigrafía.- 1er estrato.- Limos y arenas finas en la capa superior. 2do.estrato.- Arenas finas. Ambas sobre basamento de roca
- Establecida la presencia de metales pesados según los resultados de los análisis en AA.
- Modelo flujo de agua subterránea (acuífero)
- Modelo flujo metales pesados
- Se utiliza Visual Modflow

Desarrollo conceptual

- Geografía, topografía
- Estratigrafía del suelo
- Hidrología del área:
filtración,
evotranspiración
(caudales Rio, estero)



MAPA TOPOGRÁFICO: Parroquia San Carlos, Área Urbana



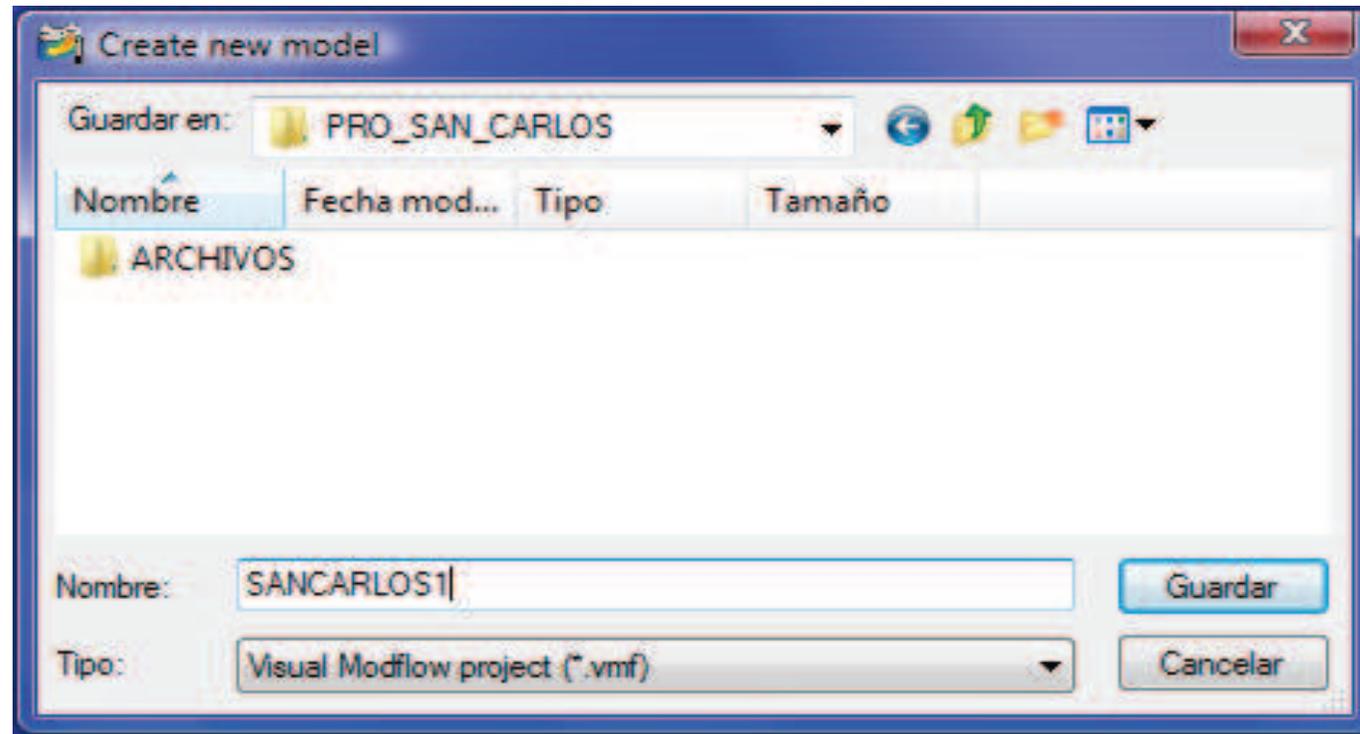
PARTES DEL MODELO

- PRIMERA: CONSTRUCCION DE MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA
- SEGUNDA: MODELO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES **Ni, Cd, Pb, V**
- TERCERA: RESULTADOS

Primera parte

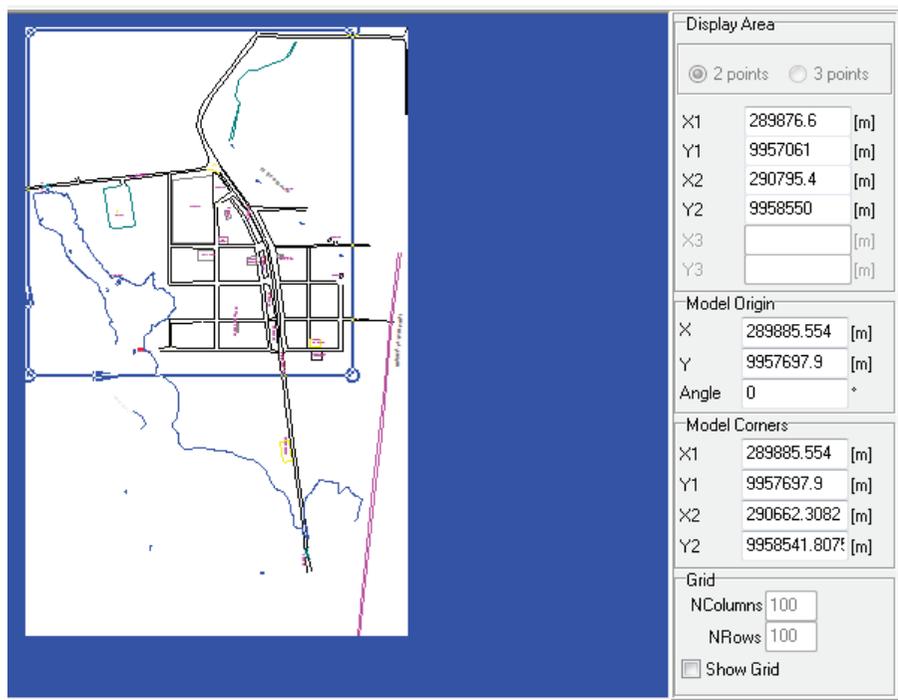
Construcción modelo de flujo agua subterránea

Creación de un archivo de datos

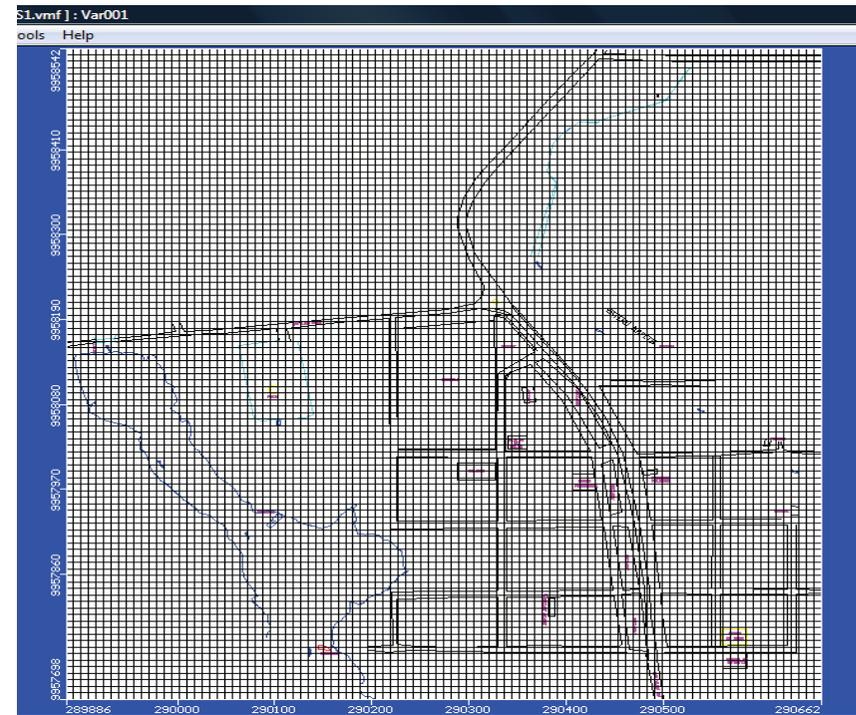


Dominio del modelo

Región del modelo

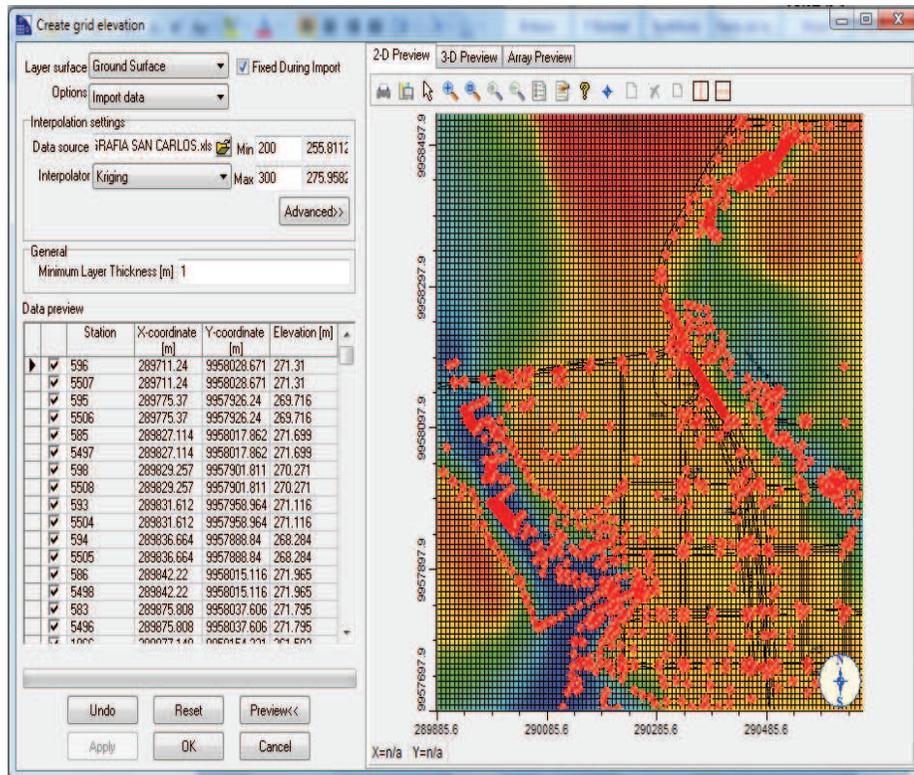


Malla

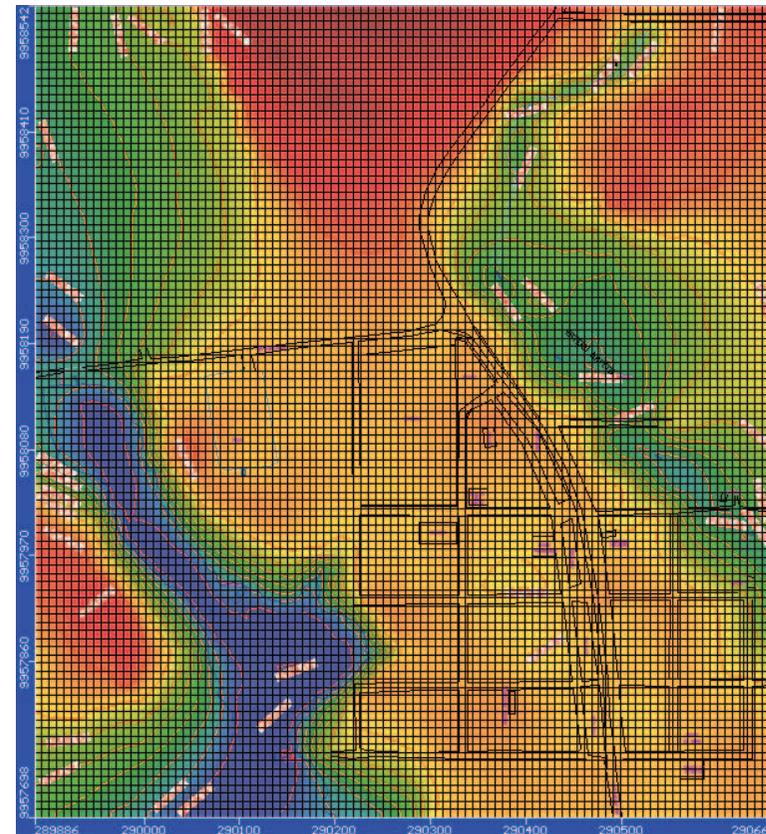


Refinamiento del modelo

Topografía superficie



Curvas de nivel

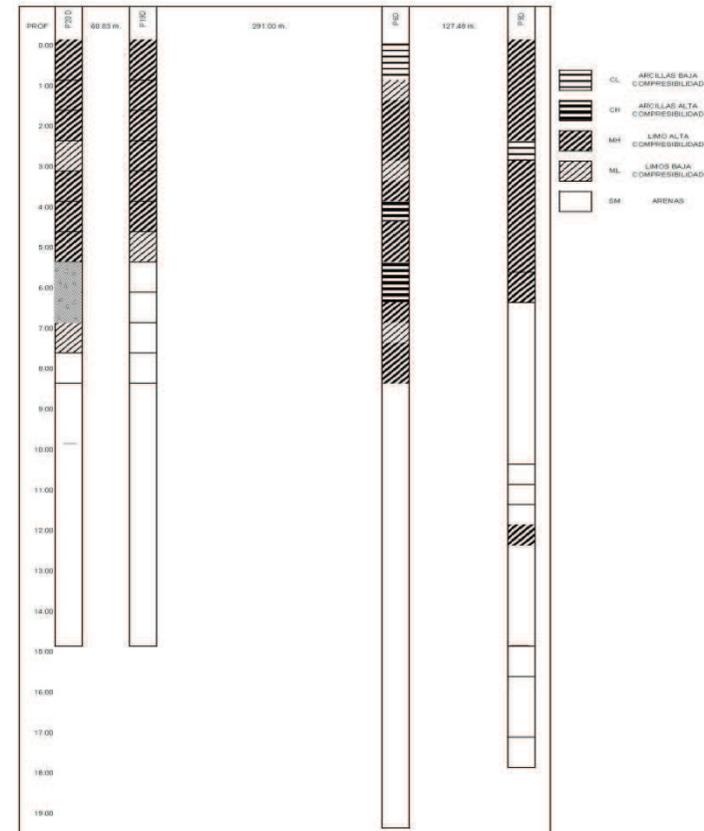


ESTRATOS EN EL SUBSUELO

Datos en archivos

- Conductividad capa 1
- Conductividad capa 2
- Coordenadas pozos cotas estratigrafía
- Cotas nivel freático
- Contaminantes
- Puntos topográficos San Carlos

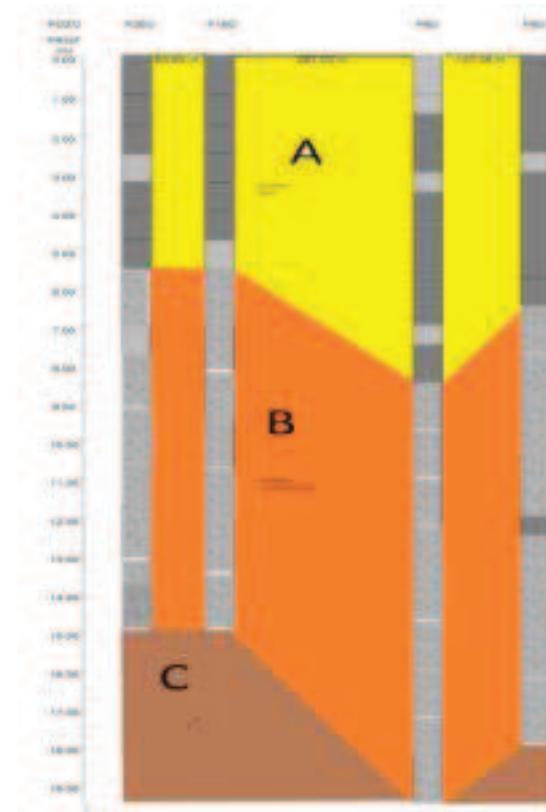
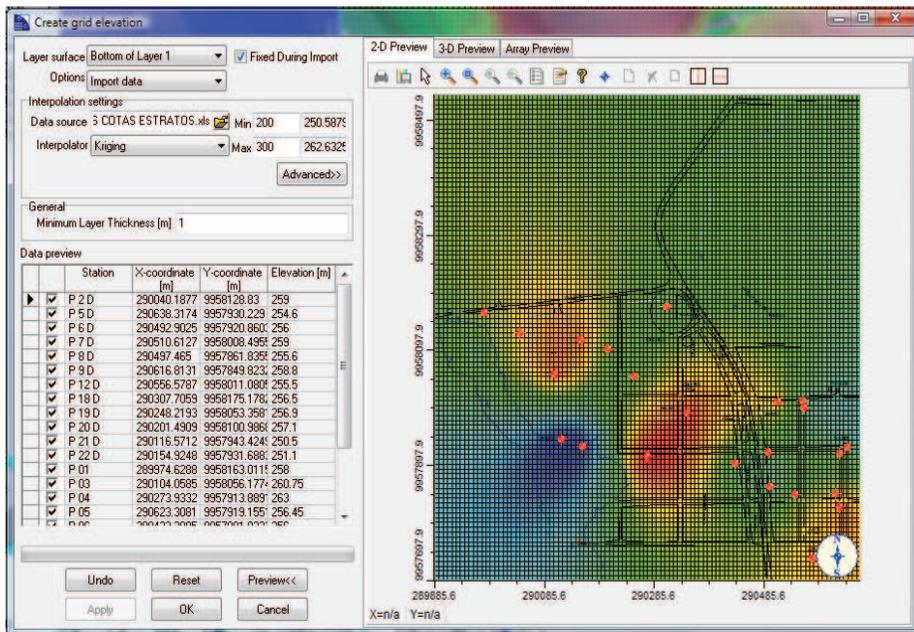
Perfil estratigráfico



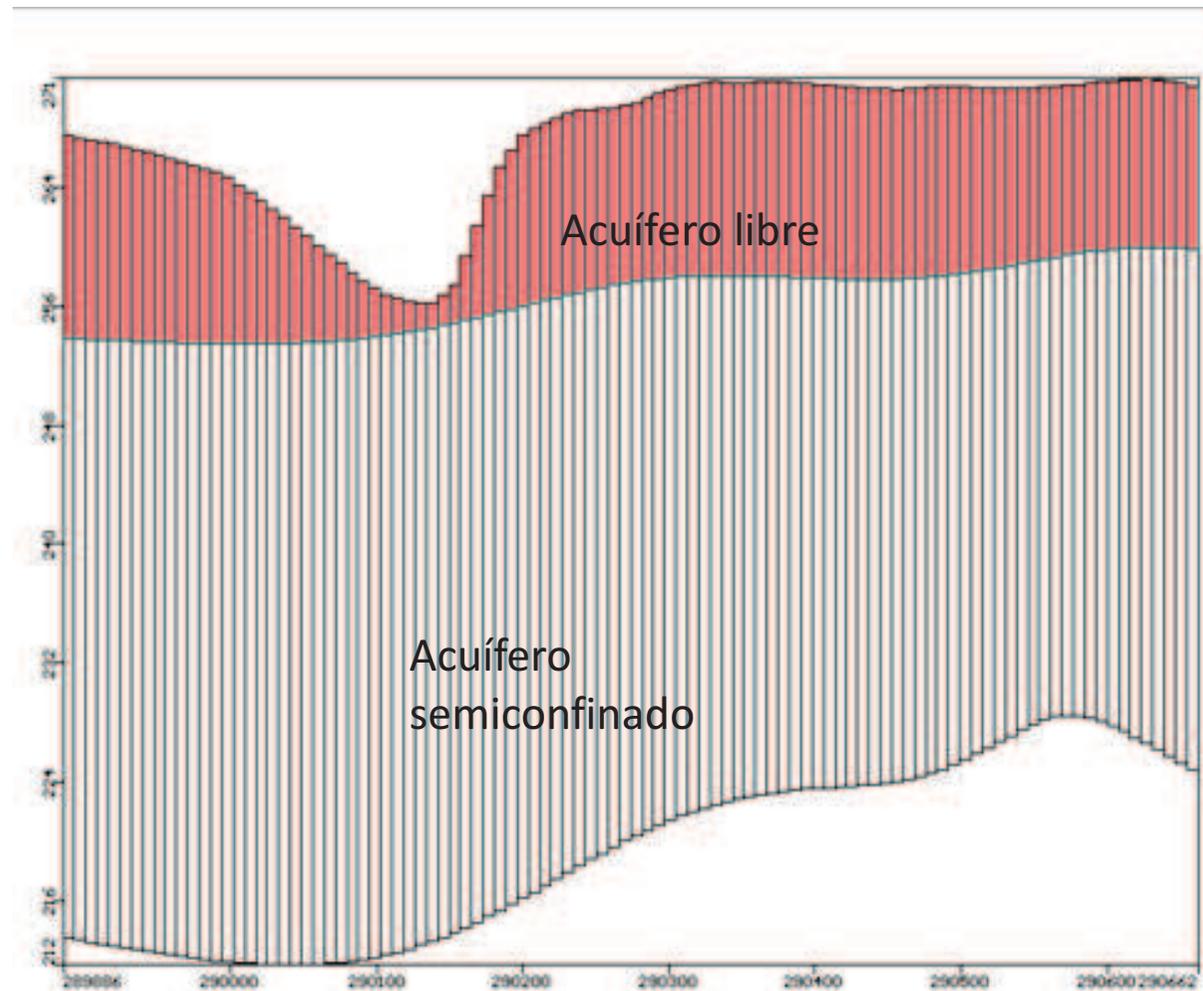
Pozos de observación

Pozos observación

Acuífero libre y semiconfinado.
Estratigrafía



Acuífero libre y semiconfinado



Asignación de Propiedades hidráulicas de acuífero

Caudales

Aforos en río Huamayacu

Aforo 1	1.268 m3/seg	Puente 1 (vía río napo)	957948, 9958196
Aforo 2	7.73 m3/seg	Salida alcantarilla	958151, 9957801
Aforo 3	1.252 m3/seg	Terreno Sr. tipán	957828, 9957959

Aforos Estero Sapito

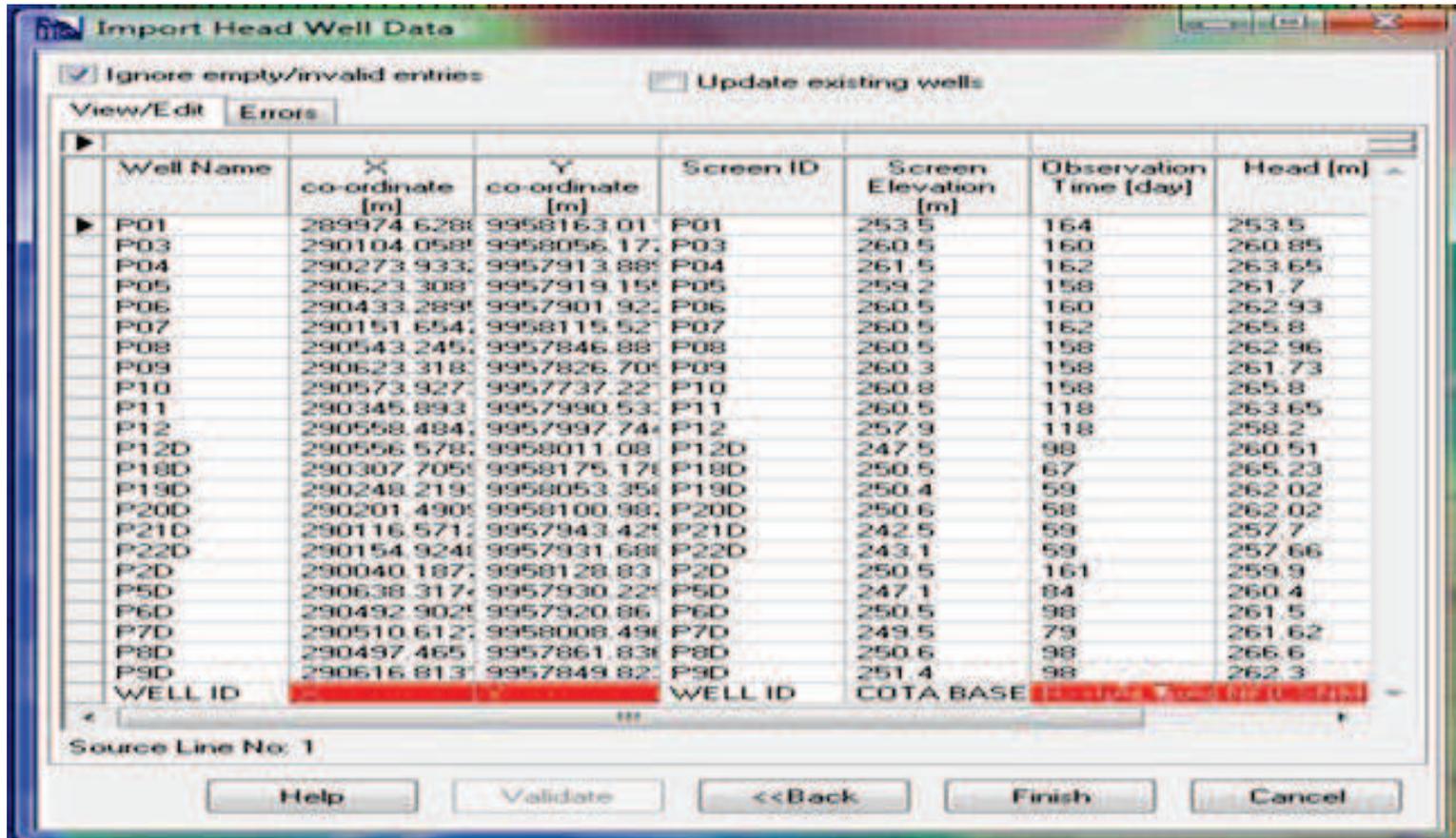
Aforo 1	0.0099 m3/seg	Salida alc. Sacha	958531, 9958503
Aforo 2	0.001 m3/seg	Diagonal a escuela	958365, 9958279
Aforo 3	0.00023 m3/seg	Aguas abajo de dique	958435, 9958210

Permeabilidades

Parámetro	Capa Limos y arcillas (Layer 1)	Capa de arena (Layer 2)
Kx (m/seg)	5.1557738x10-7	2.4893704x10-6
Ky (m/seg)	2.36422x10-5	4.72843x10-5
Kz (m/seg)	1.0346231x10-6	1.8062243x10-5
Ss (1/m)	2.22316x10-6	2.76558x10-5
Sy	0.23	0.17
Porosidad efectiva	0.23	0.17
Porosidad total	0.58	0.39

Objetivos de calibración

Cotas nivel freático



Import Head Well Data

Ignore empty/invalid entries Update existing wells

View/Edit Errors

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	9957846.88	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
P5D	290638.317	9957930.22	P5D	247.1	84	260.4
P6D	290492.902	9957920.86	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

Source Line No: 1

WELL ID COTA BASE

Buttons: Help, Validate, <<Back, Finish, Cancel

Asignación de las condiciones de borde

River - [Assign Line]

File Help

Description: RIO HUAMAYACU

Assign to appropriate layer

Use default conductance formula

Linear gradient

Start point End point

Edit selected row(s) or column: (\$RCHLING*\$RBB)

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

OK Cancel

River - [Assign Line]

File Help

Description: RIO HUAMAYACU

Assign to appropriate layer

Use default conductance formula

Linear gradient

Start point End point

Edit selected row(s) or column: (\$RCHLING*\$RBB)

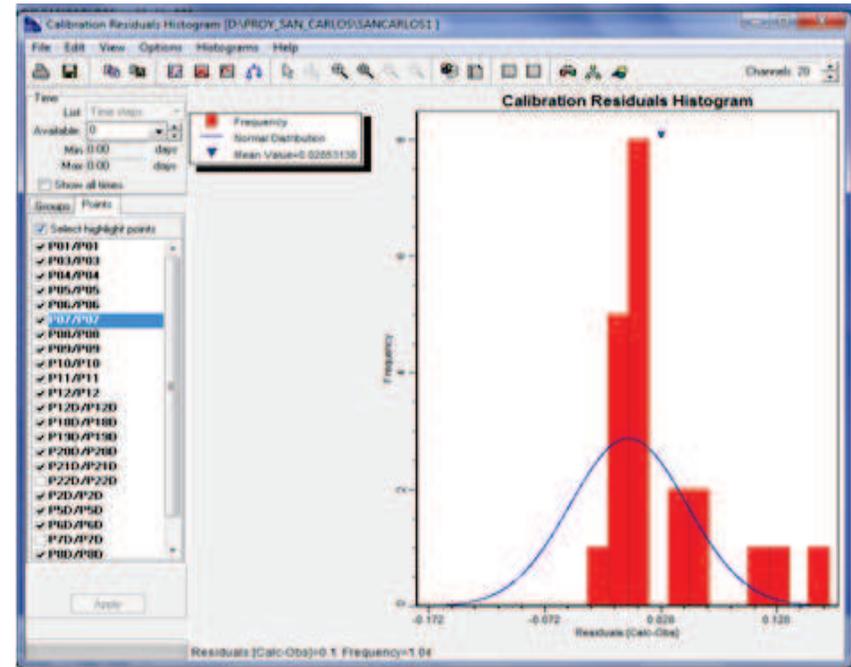
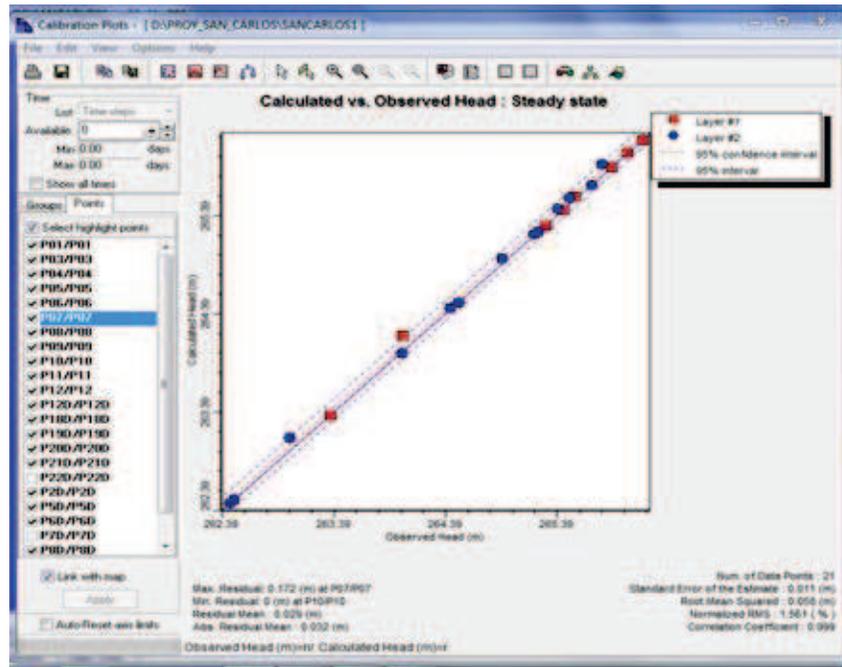
Start Time [day]	Stop Time [day]	River Stage [m]	Riverbed Bottom [m]	Conductance [m ² /day]	Riverbed Thickness [m]	Riverbed Kz [m/s]	River Width [m]	Active
0	18250	257	255.00	(\$RCHLING*\$RBB) 0.4		3.17594E-9	10.0	<input checked="" type="checkbox"/>

OK Cancel

Calibración del modelo

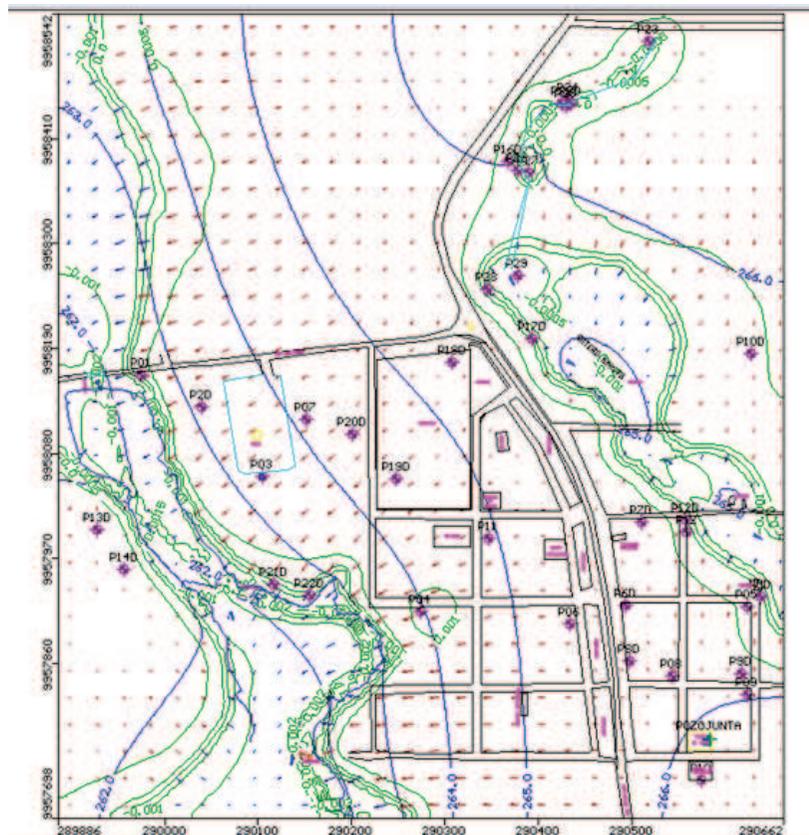
Calculado vs observado

Histograma calibración
residuales

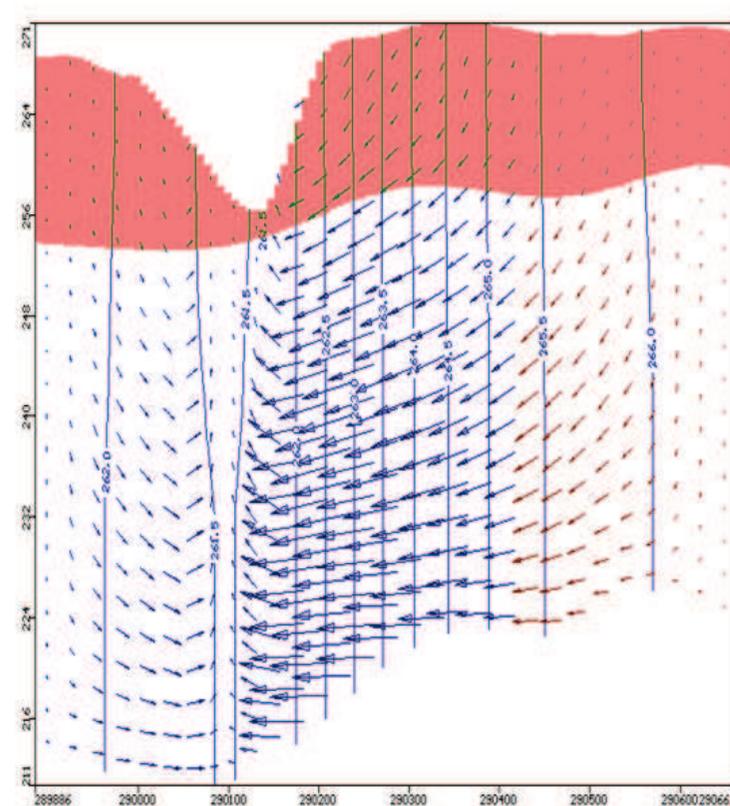


Modelo de flujo de agua subterránea

Equipotenciales, dirección del flujo de agua

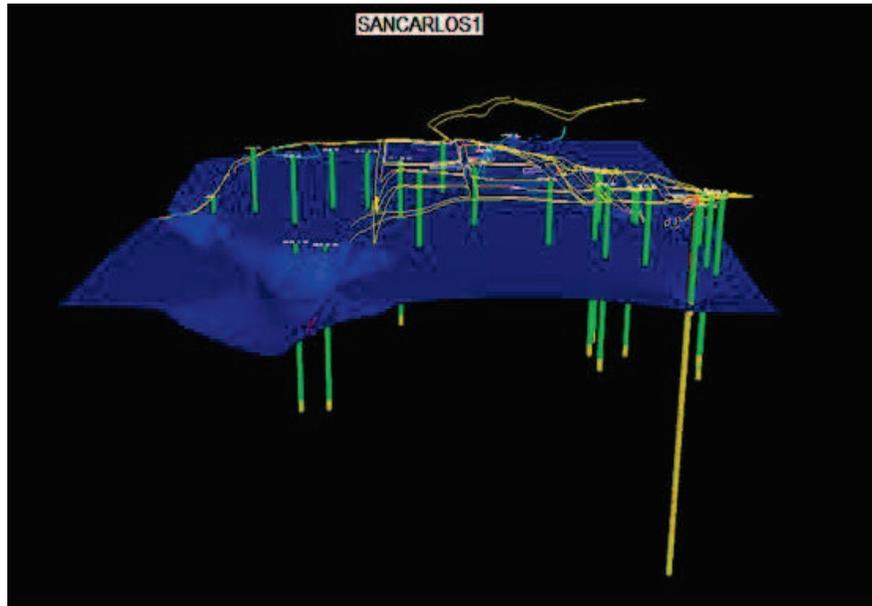


Dirección flujo agua subterránea

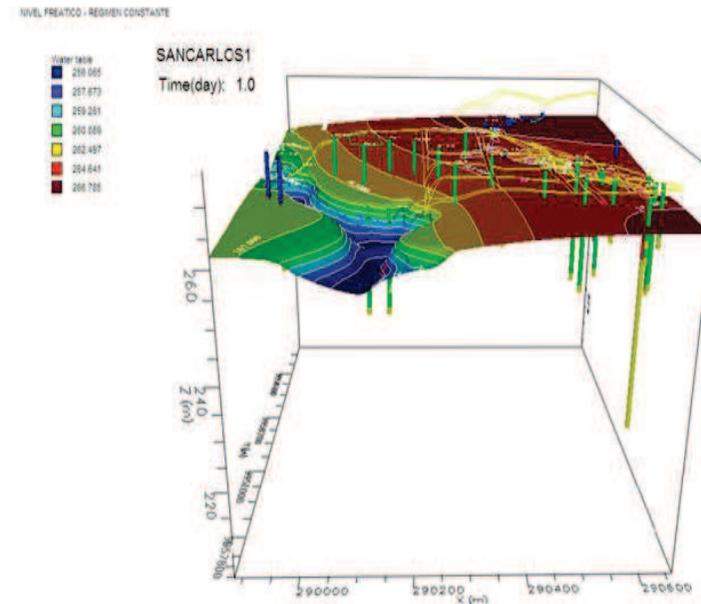


Modelo flujo agua subterránea vista tridimensional

Nivel freático



Nivel freático según curvas nivel



Segunda parte

Modelo de transporte de contaminantes

Concentración actual de los metales pesados Ni, Cd, Pb, V

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

Propiedades:

Coeficiente distribución: Kd

Condición de borde Estero Sapito

Metal	Fórmula EPA	pH	Kd
Cd	$Kd = 10^{0.397 \cdot \text{pH} - 0.943}$	5.87	24.4
Ni	$Kd = 10^{0.332 \cdot \text{pH} - 0.471}$	5.87	30.04
Pb	$Kd = 10^{0.0786 \cdot \text{pH} + 1.55}$	5.87	100.18
V	EPA	5.87	1000

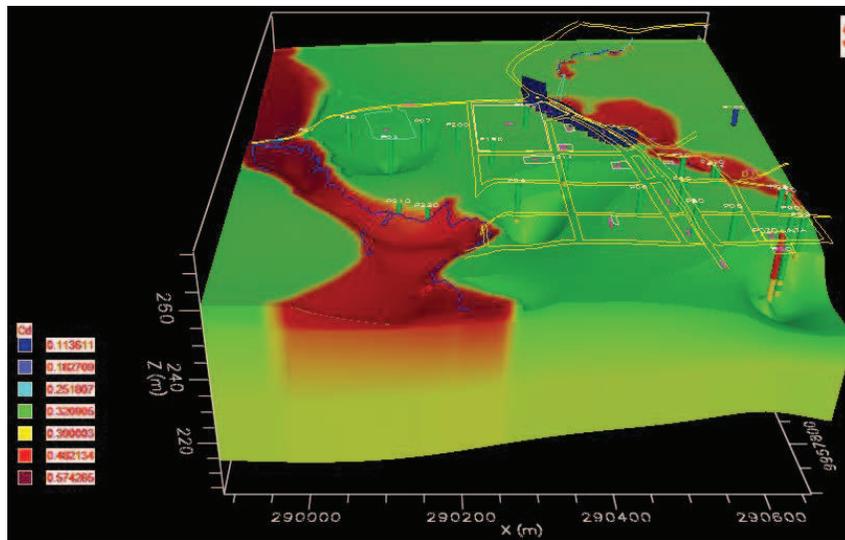
Metal	Concentración constante (mg/L)
Cd	0.38
Ni	4.81
Pb	16
V	2.42

Tercera parte

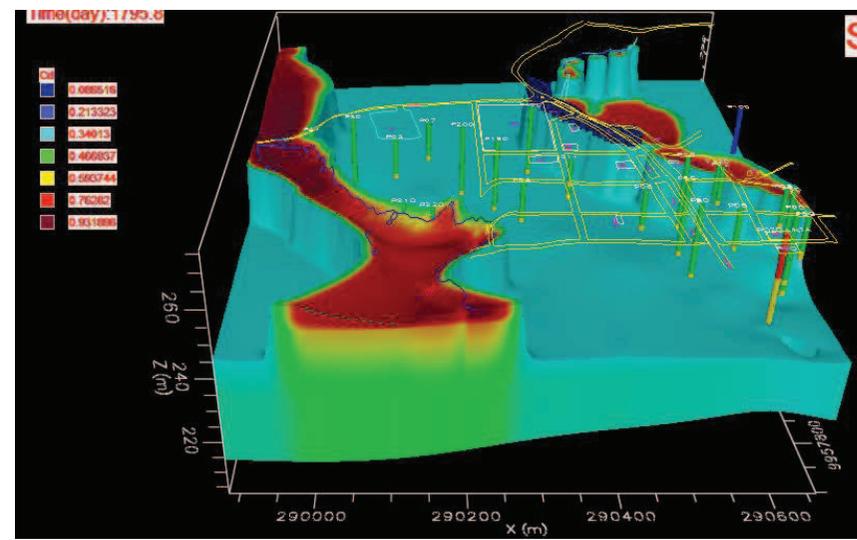
Visualización de resultados

Pluma contaminación Cadmio

365 días (1 año)



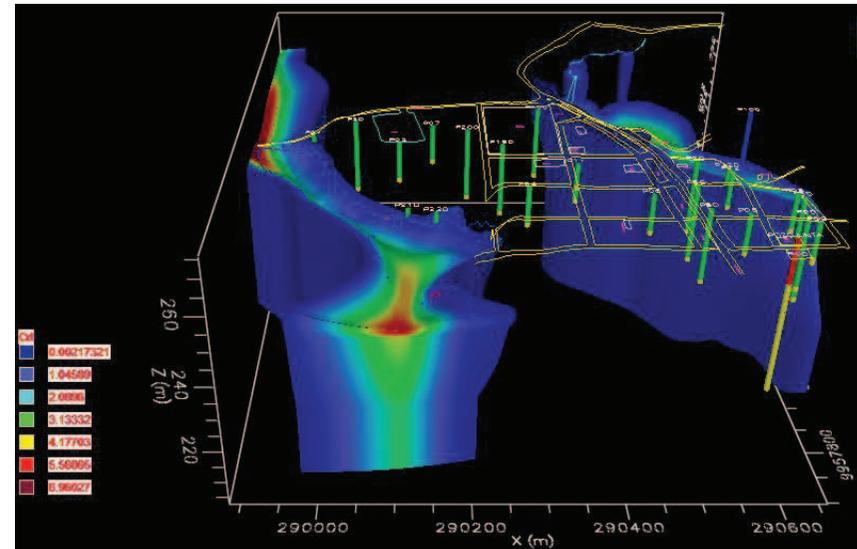
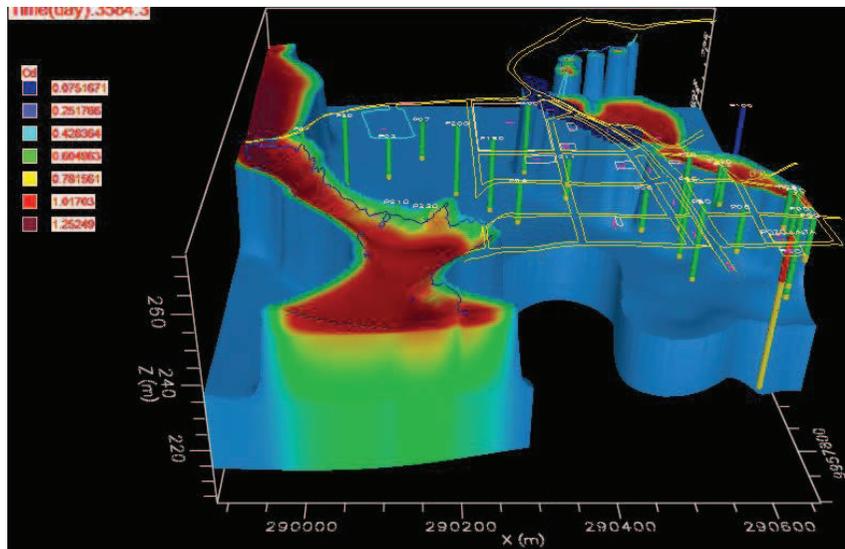
1825 días (5 años)



Pluma contaminación Cadmio

10 años

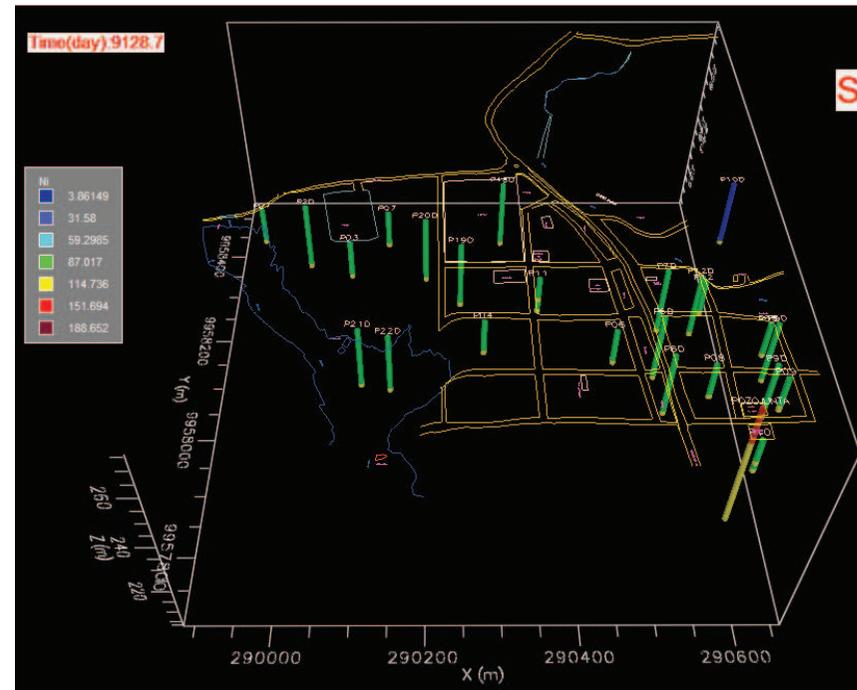
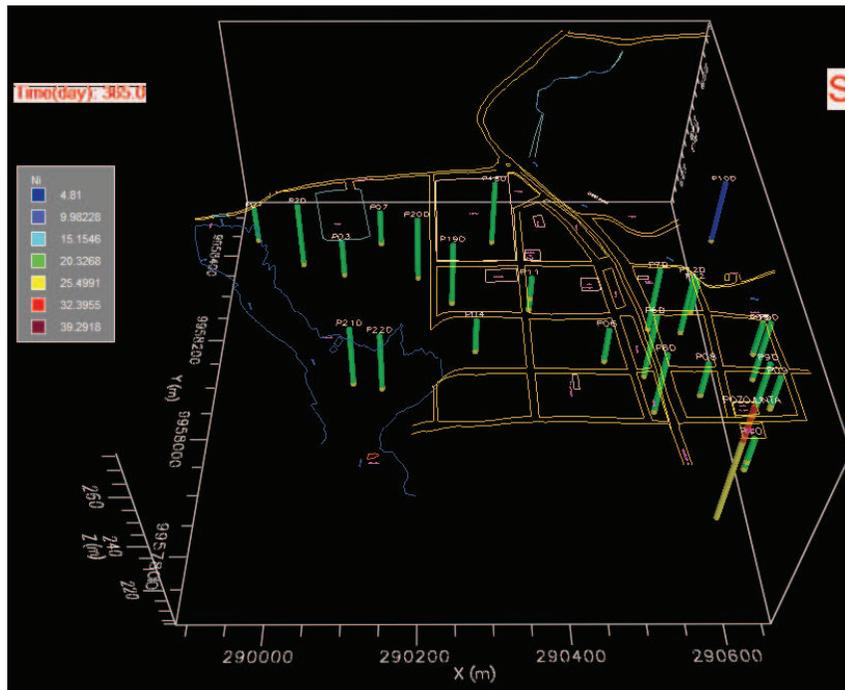
50 años



Pluma contaminación Níquel

365 días (1 año)

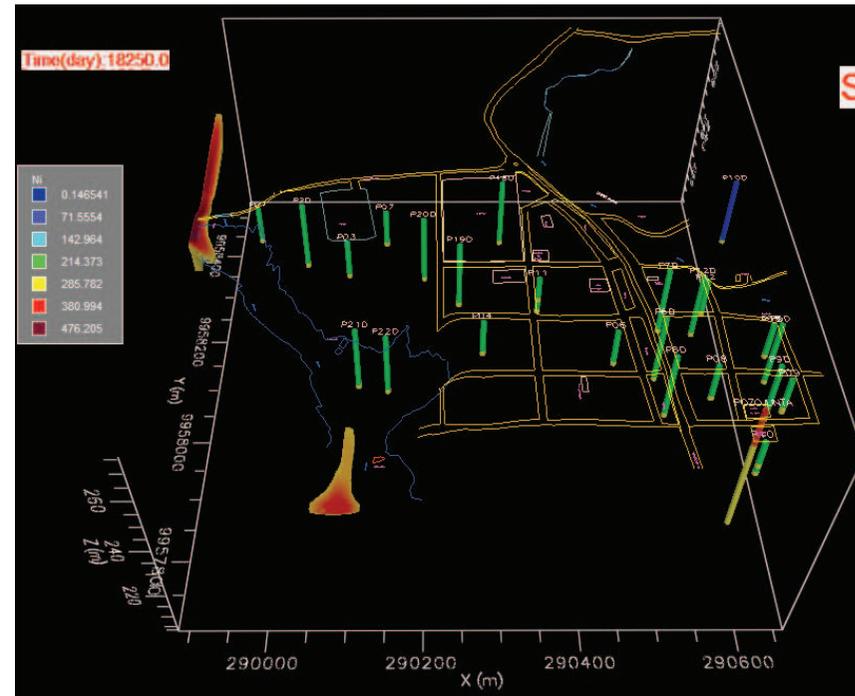
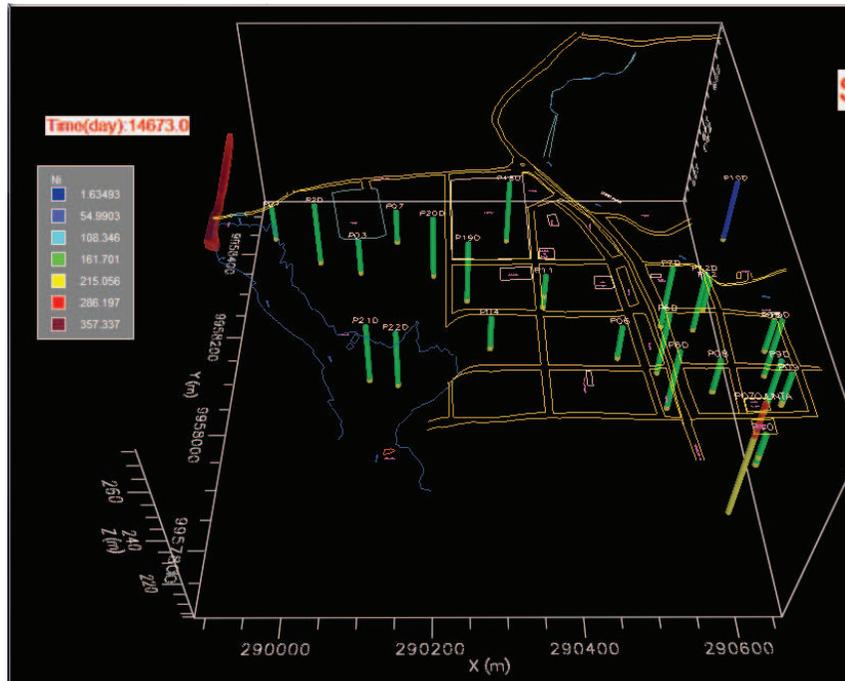
9125 días (25 años)



Pluma contaminación Níquel

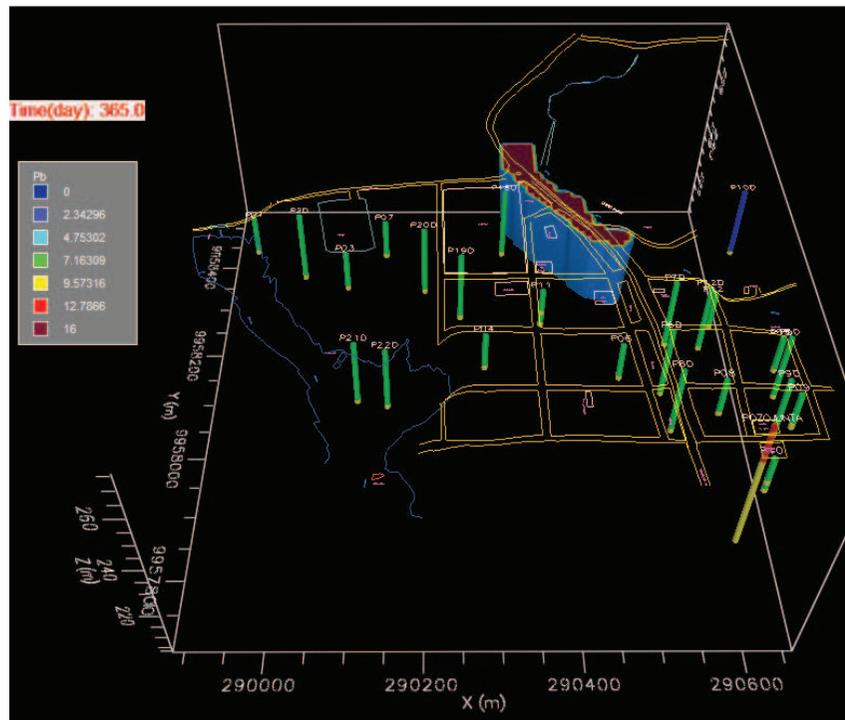
40.2 años

50 años

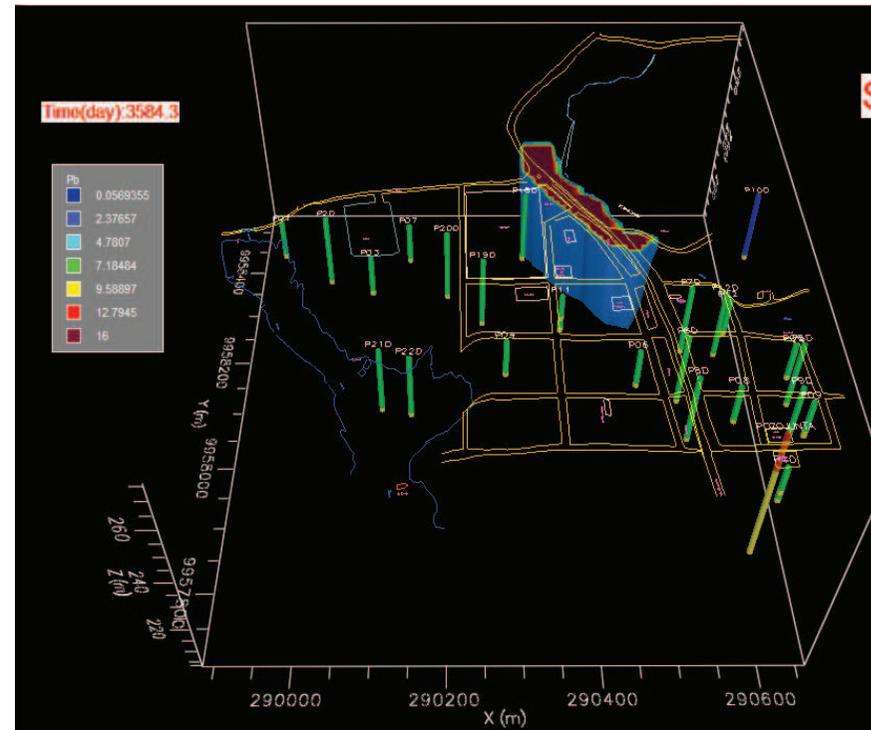


Pluma contaminación Plomo

1 año

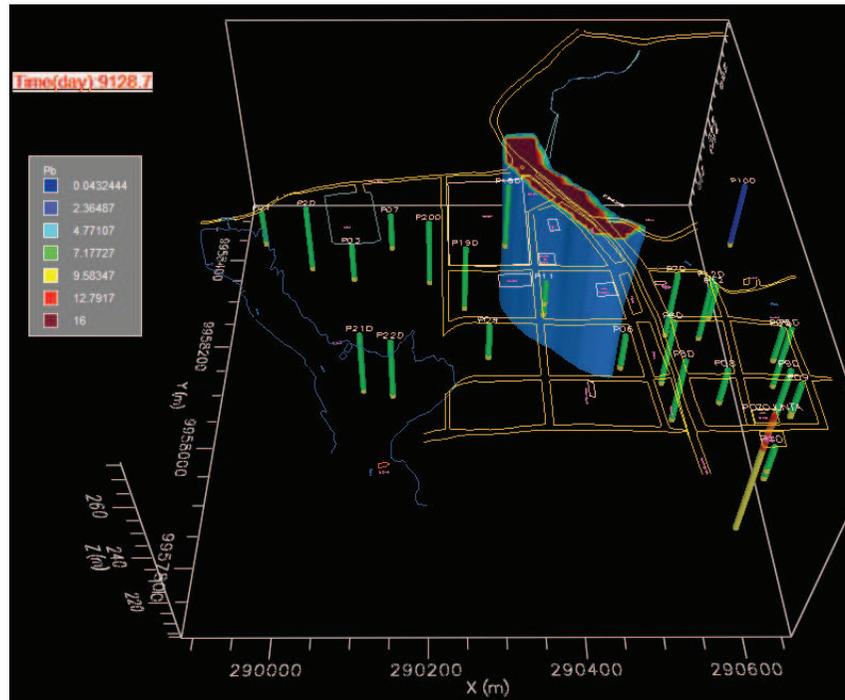


10 años

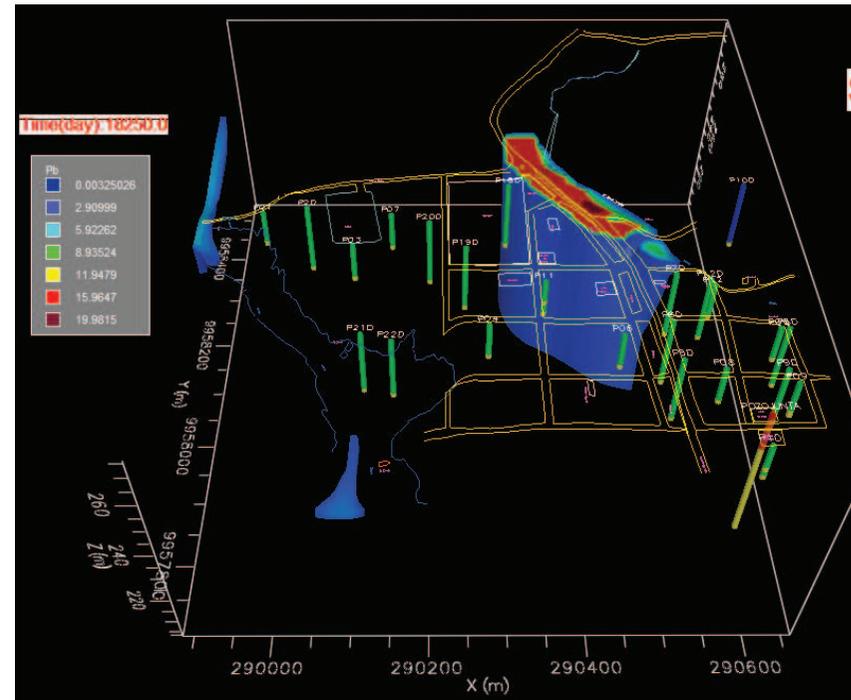


Pluma contaminación Plomo

25 años

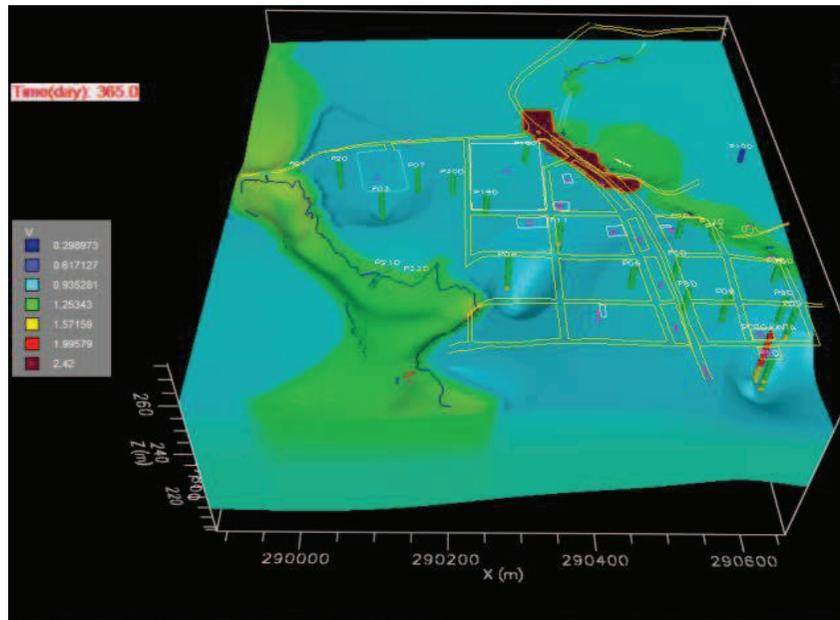


50 años

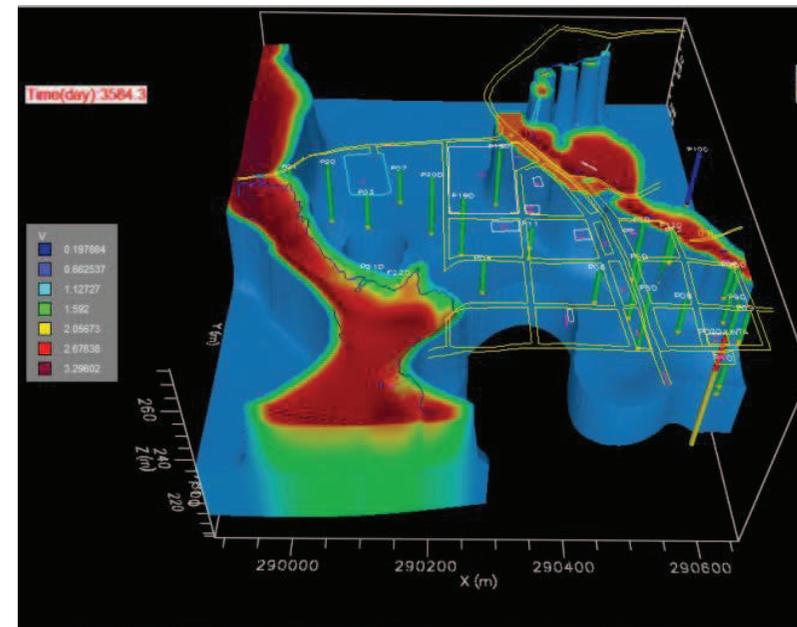


Pluma contaminación Vanadio

1 año

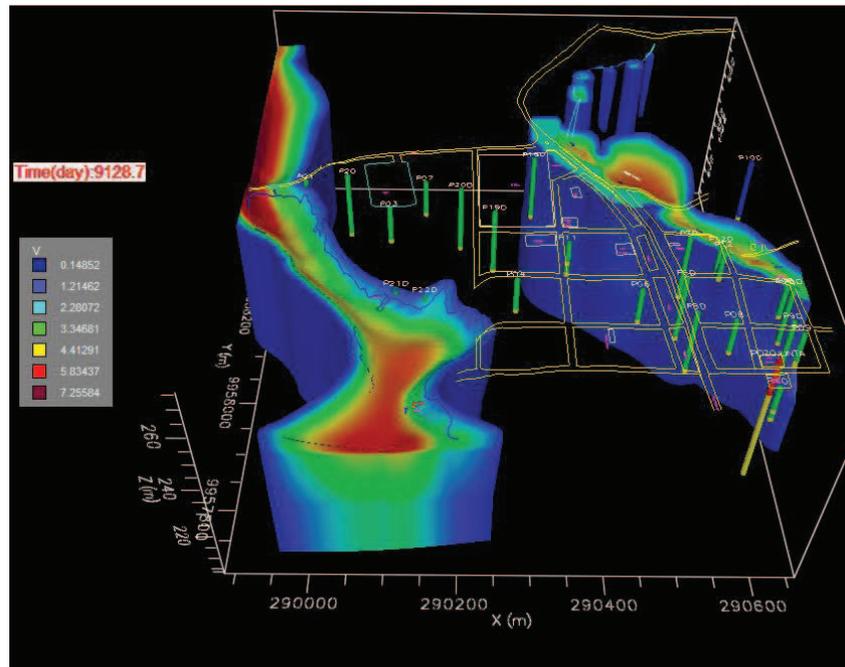


10 años

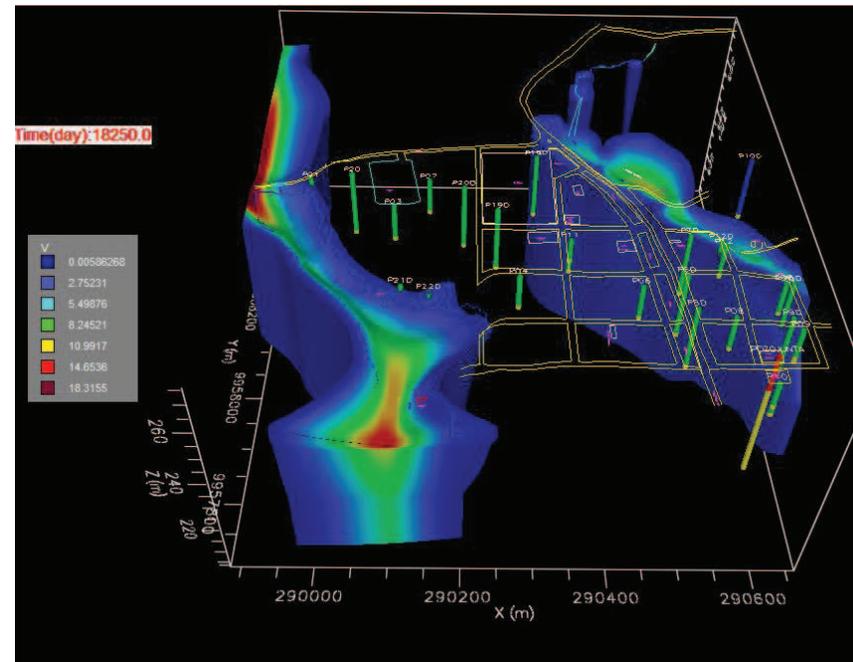


Pluma contaminación Vanadio

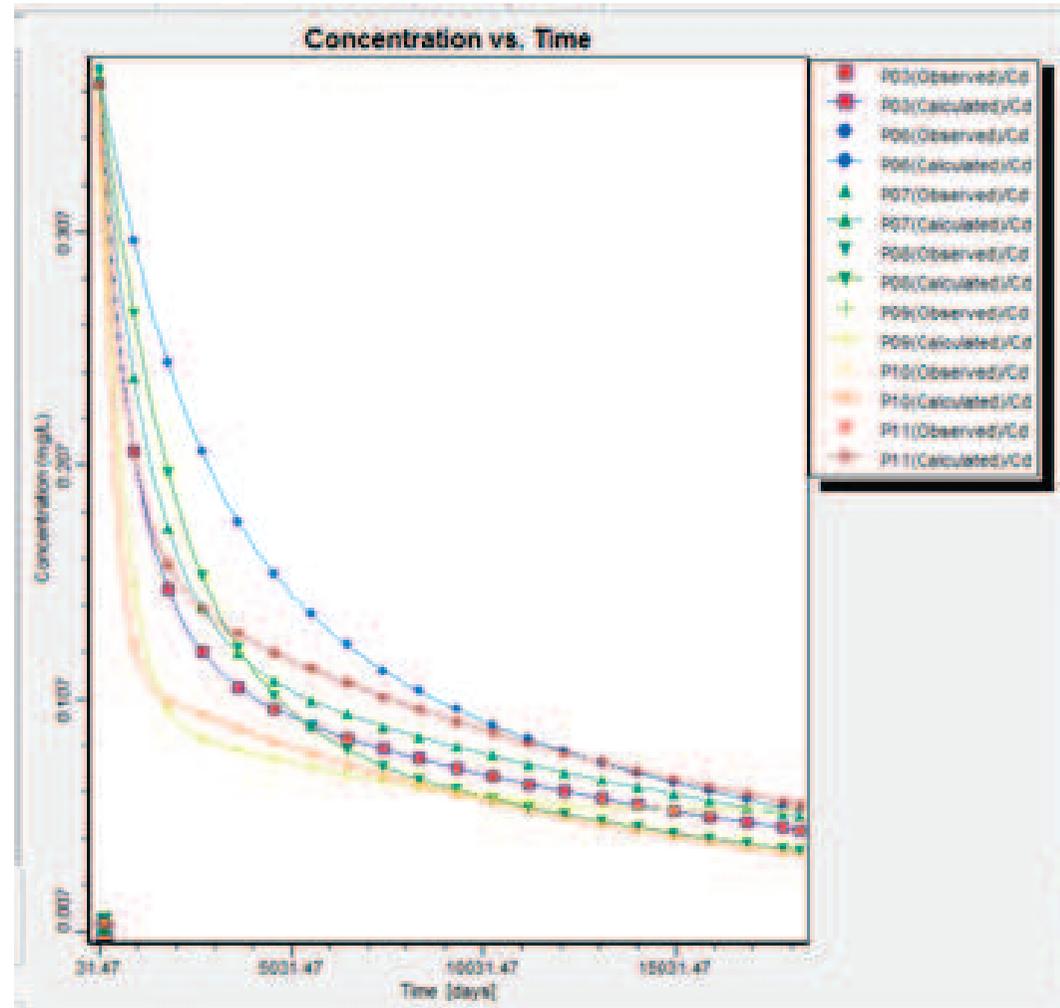
25 años



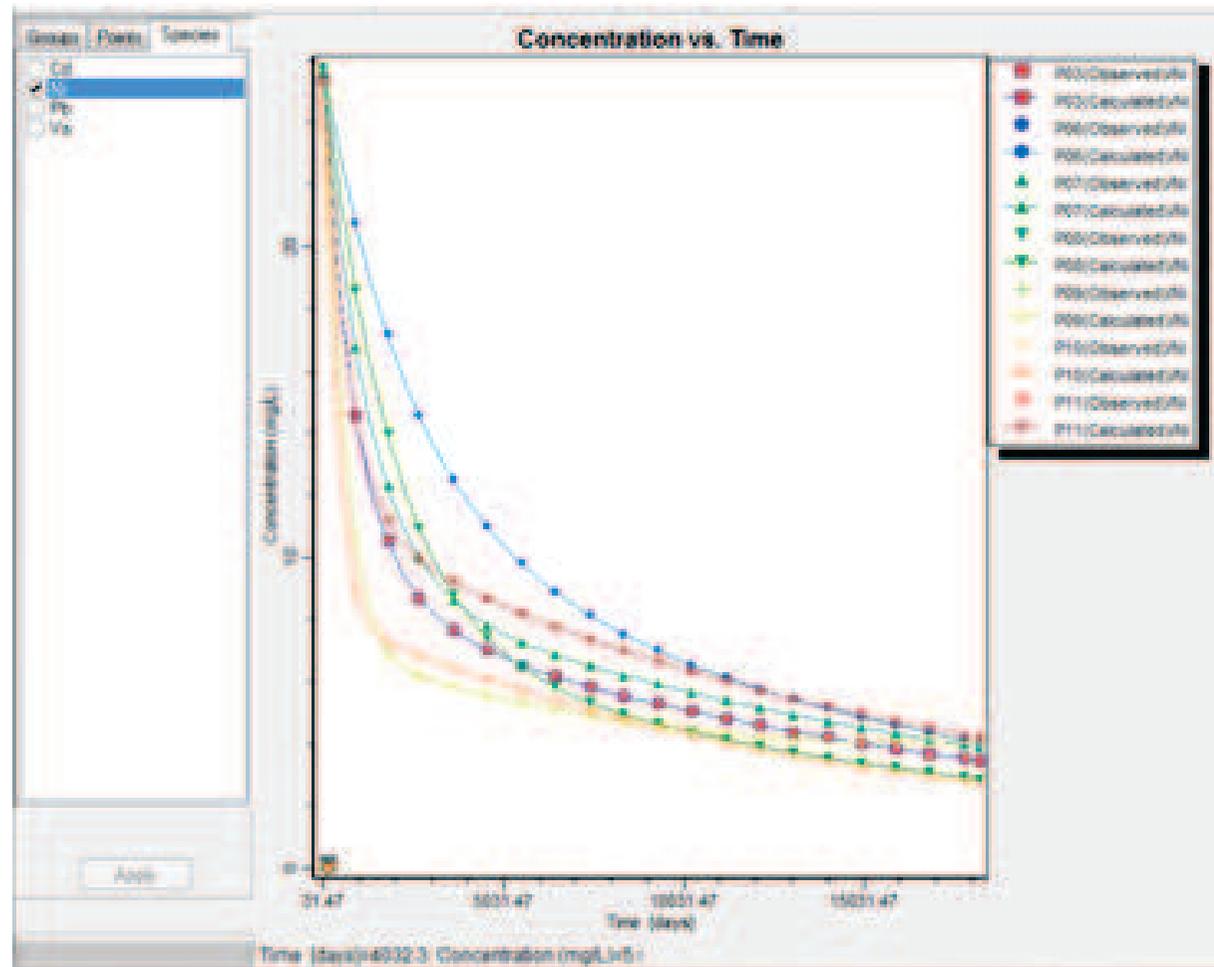
50 años



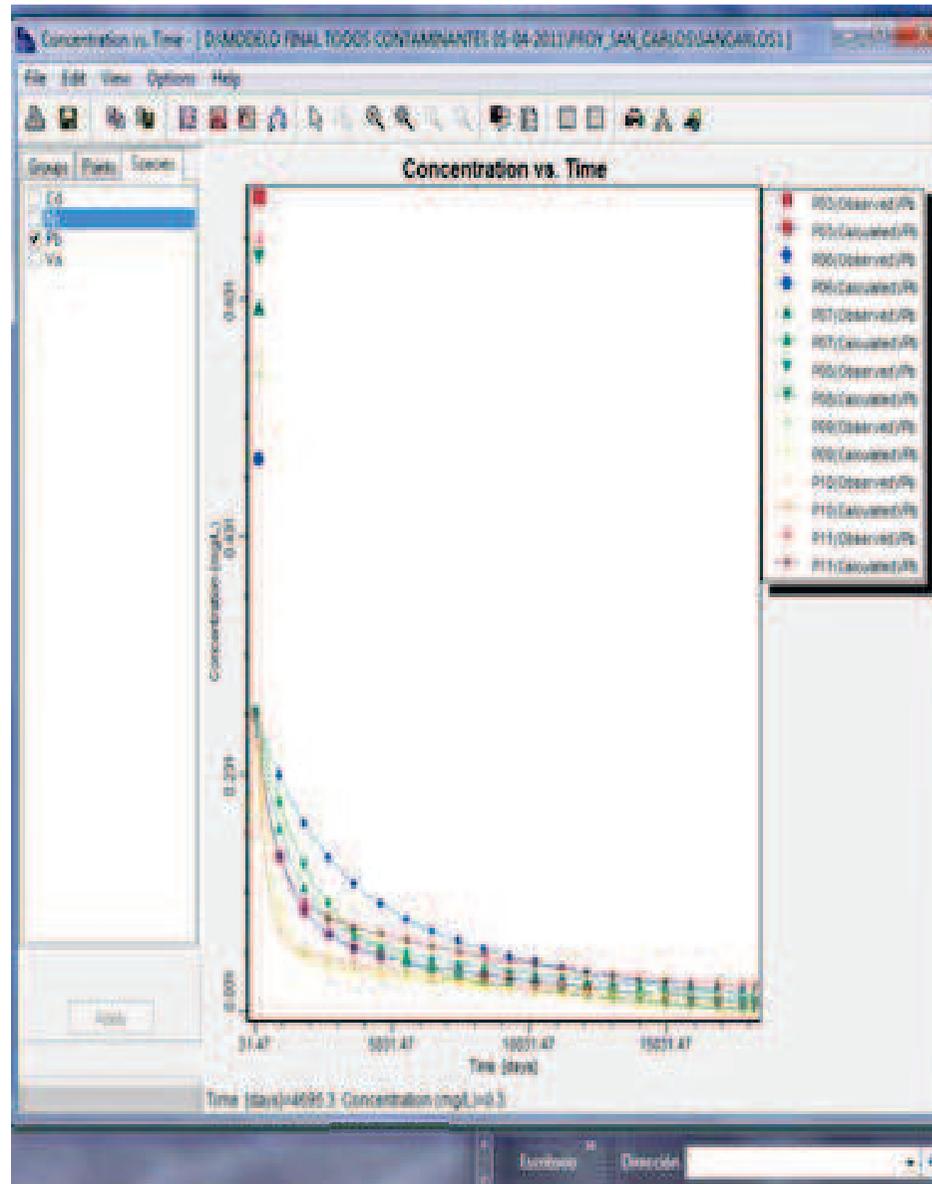
Concentración Cd(mg/l) vs tiempo(años)



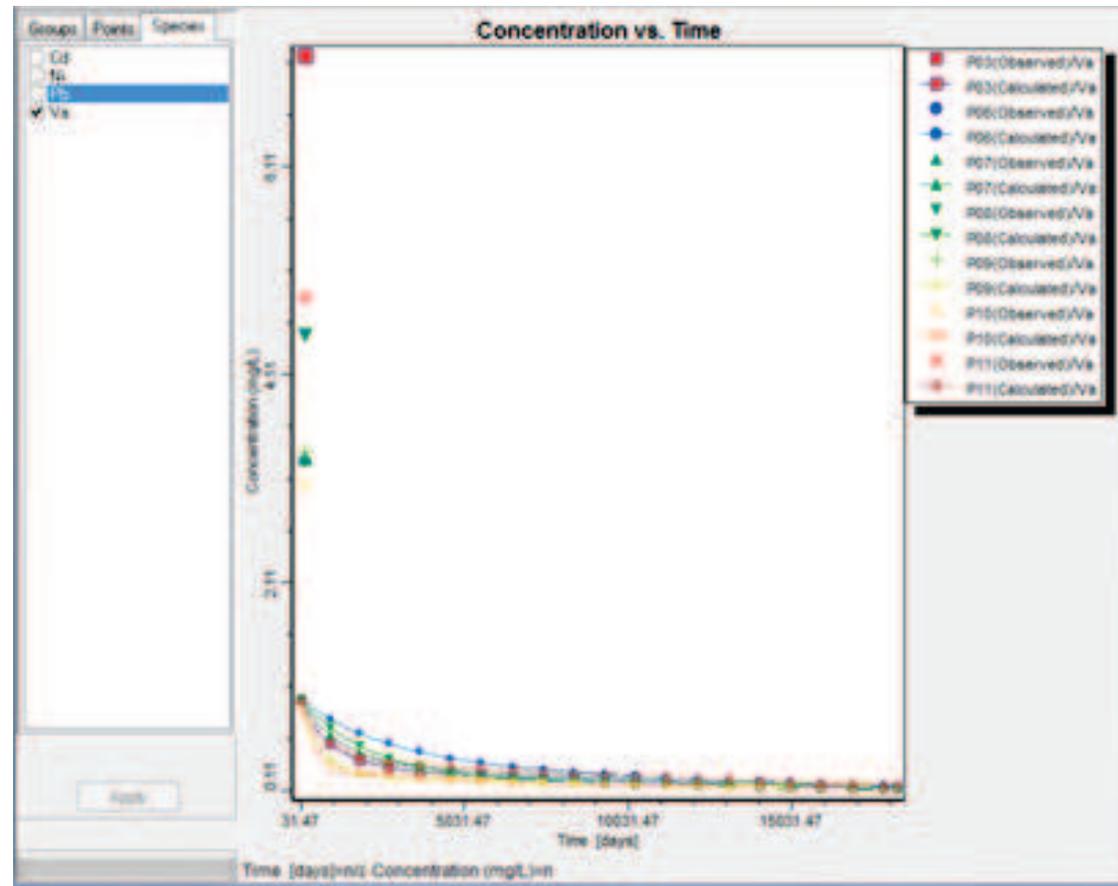
Concentración Ni(mg/l) vs tiempo(años)



Concentración Pb(mg/l) vs Tiempo(años)



Concentración V(mg/l) vs Tiempo (años)



Discusión de resultados

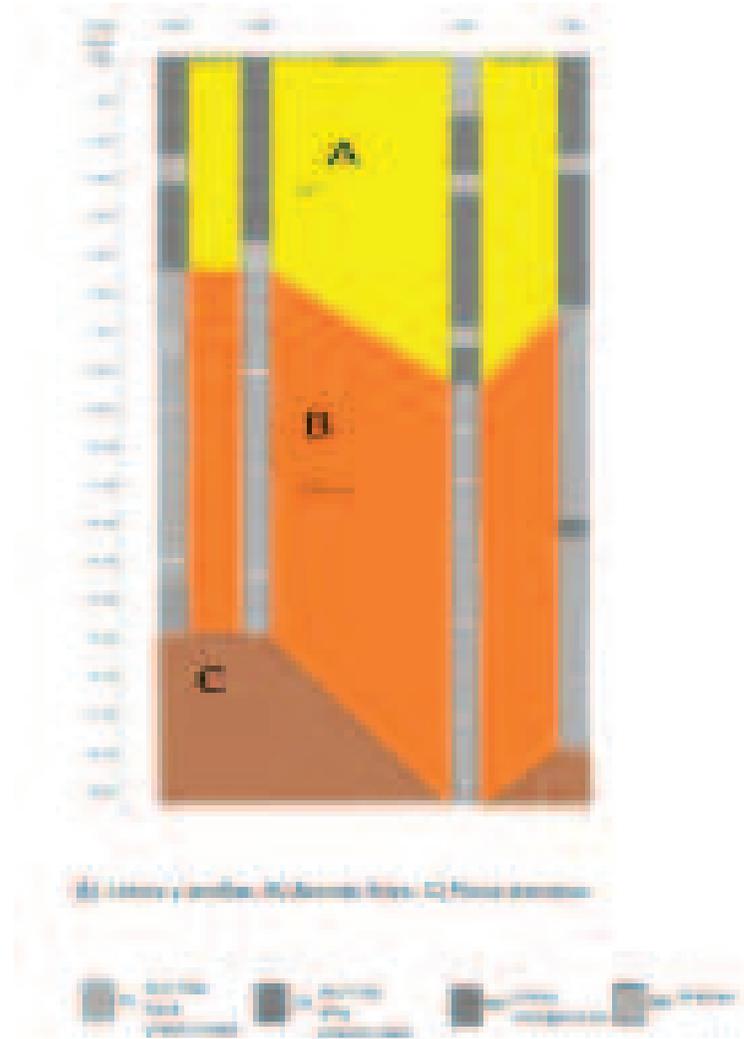
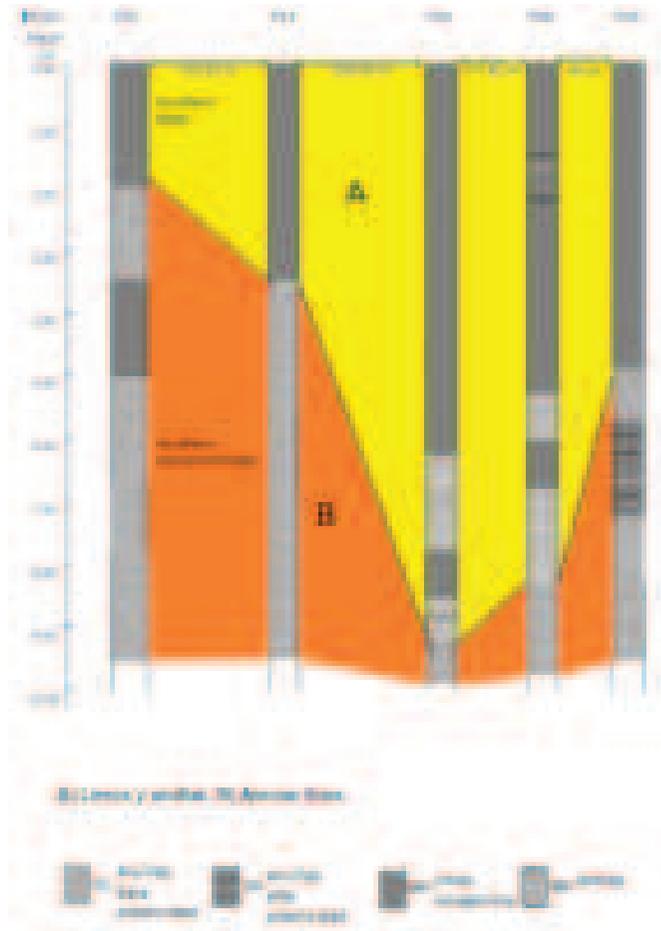
- Geofísica
- Sondeos de exploración
- Hidrología
- Caracterización química
- Comportamiento de plumas de metales Ni, Cd, Pb, V
- Efectos de electronegatividad
- Resultados de plumas de contaminación

Geofísica

Correspondencia geológica

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

Sondeos de exploración



Hidrología

Ensayos

- Precipitación 3386 mm/año
- Evaporación 395 -988 mm/año
- Recarga 4.3 % precipitación
- Permeabilidad acuífero libre 3.35×10^{-6} a 1.7×10^{-8} m/seg
- Permeabilidad acuífero semi confinado 5.83×10^{-5} a 2.25×10^{-5} m/seg.
- Porosidad efectiva acuífero libre 0.23
- Porosidad efectiva acuífero semiconfinado 0.17

Modelo

- Precipitación 3386 mm/año
- Evaporación 671 mm/año
- Recarga 145.8 mm/año
- Permeabilidad acuífero libre 5.15×10^{-7}
- Permeabilidad acuífero semiconfinado 2.48×10^{-6} m/seg
- Porosidad efectiva acuífero libre 0.23
- Porosidad efectiva acuífero semiconfinado 0.17

Caracterización química

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

Óxidos presentes en el suelo

Óxidos presentes en el suelo

Si O₂ 50.89%

Al₂O₃ 43.66 %

Fe₂O₃ 9.23 %

Óxidos de hierro amorfos

Fe(OH)²⁺ 76.31%

Fe(OH) 23.75%

Fe O⁻ 0.023 %

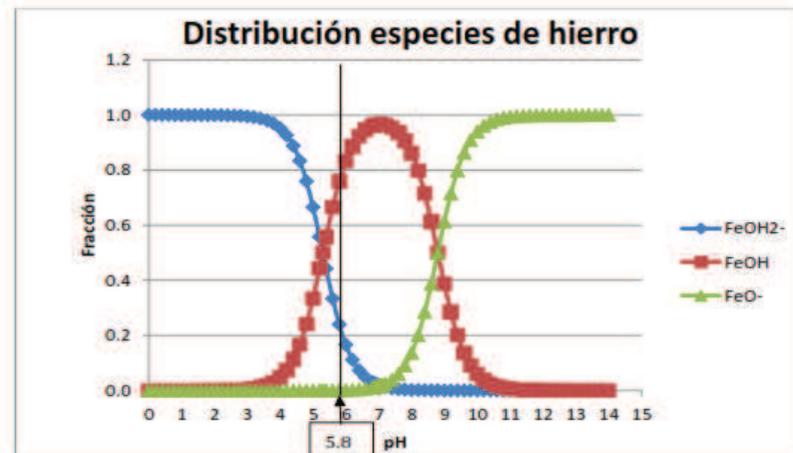
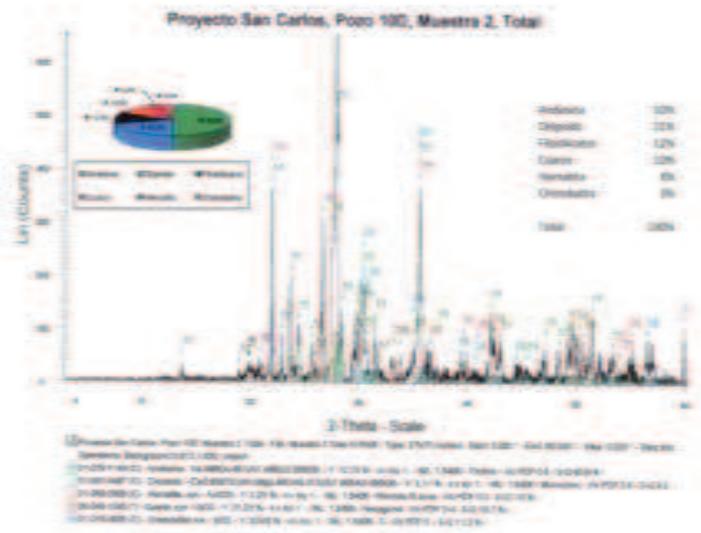


Figura 5.8: Distribución óxidos de hierro amorfos. Ubicación óxidos amorfos para un valor de pH=5.8 del subsuelo área urbana San Carlos.

Adsorción en arcillas caolinita

- 0.12 – 1.41 mg/g Pb
- 0.32 mg/g Cd

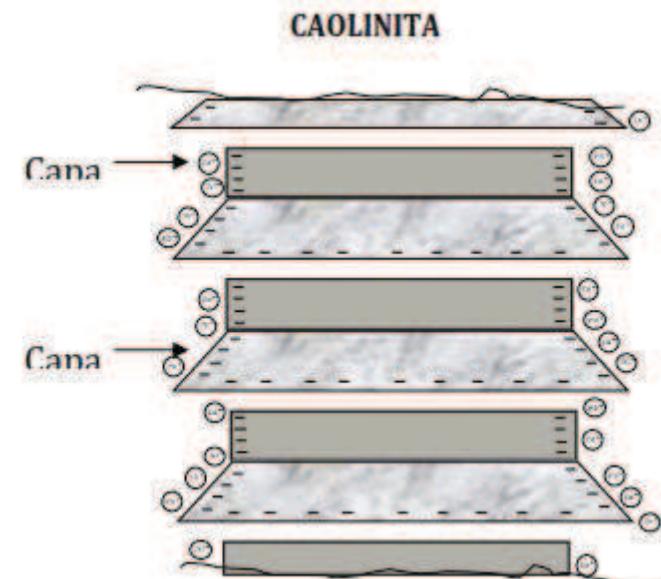
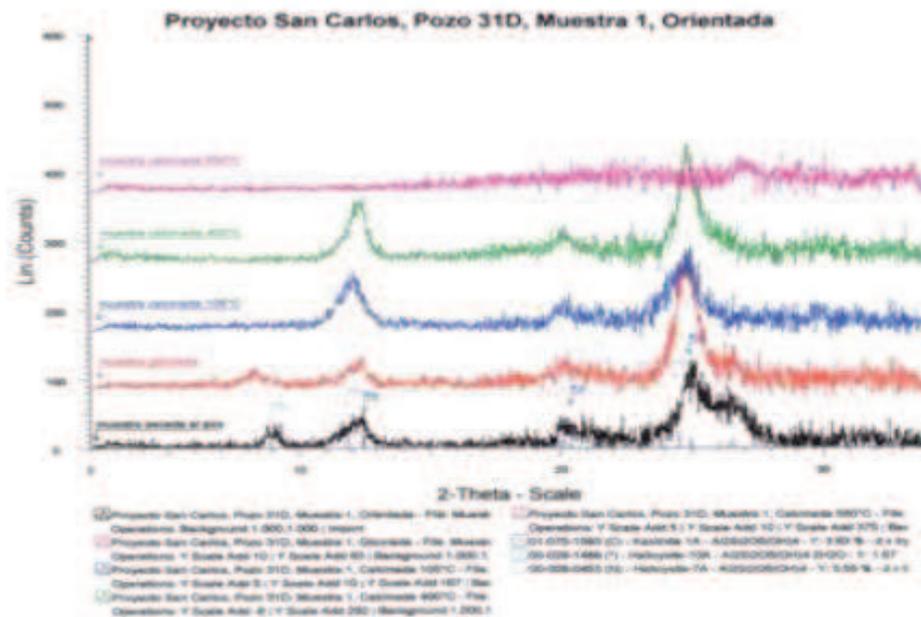


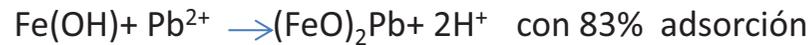
Figura 3.22: Determinación de minerales arcillosos. Fuente autor

Adsorción de Ni, Cd, Pb, V

Adsorción en minerales de hierro
Efectos de la electronegatividad

Para la pluma del Pb

A Ph = 5.8



Por su alto peso específico de Pb penetra y permanece a mayores profundidades del acuífero.

El radio atómico de Pb es pequeño con electronegatividad elevada y atrae agua. Se transforma en catión hidratado muy grande por tanto se mueve muy lento

En la pluma se observa , solo una pequeña cantidad se dispersa desde estero hacia el río en 50 años.

Resultado, Pb tiene una movilidad muy baja

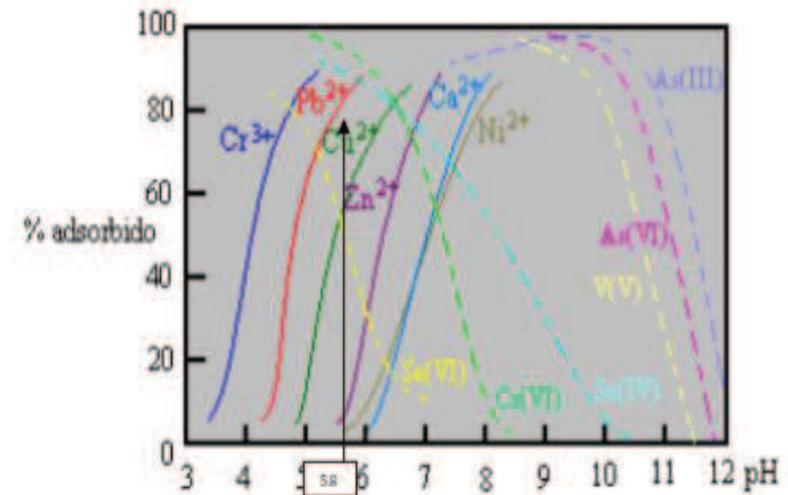
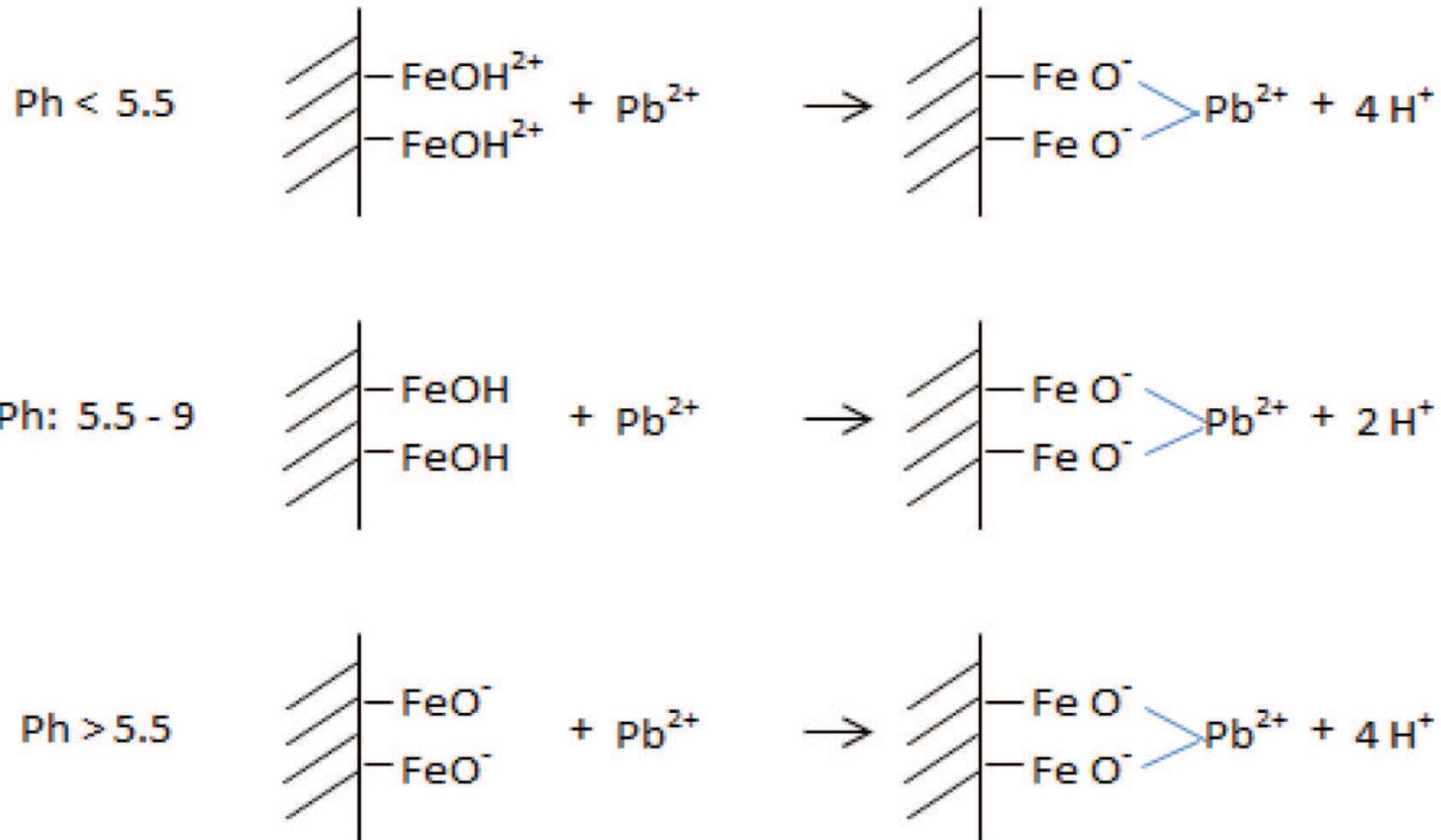


Figura 5.9: Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales y oxianiones metálicos sobre hidróxidos de hierro amorfo (Manzione y Merrill, 1989)

Para pluma Pb (continuación), esquema genérico

Formación de complejos con plomo Pb

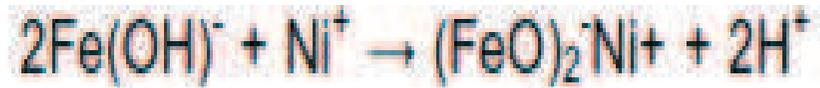


Para la pluma del Cadmio



- Captura Cd es parcial , adsorción 15%
- Según la pluma Cd tiene más movilidad que el Ni.
- Concentración de Cd en río Huamayacu aumenta en 50 años.

Para la pluma del Níquel



- Es adsorbido por óxidos de hierro hasta en n 5%.
- Ni, tiene mayor movilidad que Pb.
- La pluma se extiende bajo toda el área urbana de San Carlos.
- Termina en río Huamayacu al final de 50 años

Para la pluma del Vanadio

- V 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 el V^{+5} forma vanadatos
- El V se encuentra en el petróleo formando $H_2VO_4^-$ oxianión monovalente de vanadio.

Para la pluma del Vanadio (continuación)

- Para un pH=5.8 se
- $(\text{H}_2\text{VO}_4)^-$ con 99.18% de fracción y $(\text{HVO}_4)^{2-}$ en muy baja proporción 0.0075%

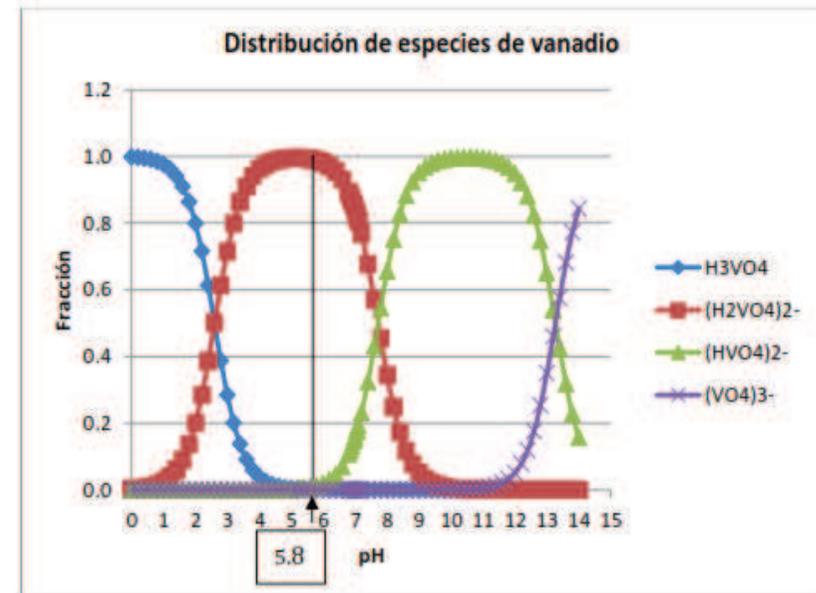


Figura 5.10: Distribución de especies de vanadio. Ubicación de especies de vanadio para un valor de pH = 5.8 del subsuelo área urbana San Carlos

Para pluma de Vanadio (continuación)

- Esquema genérico de acuerdo a dos condiciones de pH=5.8 y pH=8. Las especies de los óxidos de hierro tienen carga negativa, lo cual hace que repelan al vanadio y este forme una pluma más grande.
- Por tanto el V no se fija en su totalidad a los sólidos para migrar en el acuífero

pH=5.8	Fracción 24.0	Fracción 99.18
	$(\text{FeOH}_2)^-$	$(\text{H}_2\text{VO}_4)^-$
pH=8	Fracción 75.92	Fracción =43.41
	FeO^-	$(\text{HVO}_4)^{2-}$

Concentraciones finales según modelo a un tiempo de 50 años

Concentraciones finales según modelo a un tiempo de 50 años

Metal	Unidades	Tiempo (años)	Sitio	Resultados Modelo Acuífero confinado
Cd	mg/L	50	Leve río	6.96
Ni	mg/L	50	Río Huamayacu S-W de San Carlos	476.2
Pb	mg/L	50	Estero Sapito Cauces, río	19.985
V	mg/L	50	Huamayacu y estero Sapito	18.315

Efectos de la electronegatividad

Al Pb le siguen en fuerza de atracción el Ni, Cd y V.

Electronegatividades Plomo, Cadmio, Niquel, vanadio							
Metal	Pb	>	Ni	>	Cd	>	V
Electronegatividad	2.33	>	1.91	>	1.69	>	1.6
Adsorción según electronegatividad	Total		Media		Parcial		Nula

Constantes de solubilidad Kps

- Pb forma un hidróxido más estable y permanece retenido en el suelo, esto hace que la pluma del Pb sea muy pequeña y no se extienda a los costados más bien se va hacia el fondo

- Constantes de solubilidad

Hidróxido	Kps
Pb(OH) ₂	1.2x10 ⁻¹⁵
Cd(OH) ₂	1.2x10 ⁻¹⁴
Ni(OH) ₂	1.2x10 ⁻¹⁴



ENLAYOS
No. OAE LE 2C 05-008

REPORTE DE ANÁLISIS

Cliente: Escuela Politécnica del Ejército

Av. El Progreso S/N
Telf: 2334-950

Attn: Dr. Luis Cumbal

Proyecto: Análisis de suelos

Muestra recibida 06-jun-09

Tipo de muestra 2 muestras de suelo

Análisis completado 19-jun-09

Número de reporte Grüntec: 090637 S10 - S11 Vertiente 2

Rotulación muestra	290008E 9958101 N	290219 E 9957904 N	Método adaptado de Referencia
Fecha de muestreo	05-jun-09	05-jun-09	

Metales: ^(1,3)			
Aluminio %	1.6	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	8.5	EPA 6020A
Cobre mg/kg	26	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	36	EPA 6020A

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

Conclusiones (continuación)

La respuesta de porqué las plumas de Cd, Pb, Ni , V se extiende se deben a:

- De acuerdo a los estudios realizados el suelo de San Carlos contiene arcillas como caolín grandes cantidades de silicatos, Fe, Al
- Los silicatos son por el suelo arcilloso pero las arcillas como la caolinita adsorben Pb y Cd tal que estos puedan transportarse.
- En cambio los óxidos hidratados de Fe forman compuestos ligados fuertemente. Por tanto puede haber repulsión captura ligera o captura total de Pb
- El flujo del Pb y el Ni depende también de la electronegatividad. Por ejemplo la diferencia de la electronegatividad entre Pb y Fe es 0.55 y da lugar a ligandos más estables pero con el tiempo (años) ocurre lixiviación y son arrastrados por el agua subterránea es por eso que 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 por que la atracción electrostática es más fuerte en el Pb debido a su mayor electronegatividad.
- El vanadio forma vanadato para migrar.

Gracias su atención