



Universidad Mayor
de San Simón



International Institute
for Geo-Information
Science and Earth
Observation



Centro de Levantamientos
Aeroespaciales y Aplicaciones SIG
para el Desarrollo Sostenible de los
Recursos Naturales

Lic. Elvira Fania Guisbert Huanca

**“Transporte de metales pesados en aguas superficiales de
la subcuenca Antequera (Oruro- Bolivia)”**

**Maestría en Ciencias de la Geo-Información y observación de la
tierra, mención en Evaluación de Recursos Hídricos.**

Asesor: Lic. Stephan Dalence M.Sc.

Trabajo de Grado

**Cochabamba - Bolivia
10 de diciembre de 2008**

Aclaración:

Las opiniones y conclusiones vertidas en este trabajo son manifestadas desde el punto de vista del autor y no implica responsabilidades con el Centro de Levantamientos Aeroespaciales y aplicaciones SIG para el desarrollo sostenible de los recursos naturales.

Agradecimientos:

Un agradecimiento por la colaboración brindada al proyecto CAMINAR del Instituto de Investigaciones Químicas de Universidad Mayor de San Andrés en la ciudad de La Paz, y particularmente al Lic,. Jorge Quintanilla, Jefe del proyecto CAMINAR, quien me ayudo en las fases de campo y recopilación de información.

Al proyecto ASDI/SAREC del instituto de Hidráulica e Hidrología de la UMSA (La Paz) por la información brindada.

A las Ing Nani Santos y Norma Rodríguez de la prefectura del departamento de Oruro, quienes me ayudaron en todo el trabajo de campo realizado.

A mi asesor Stephan Dalence por el asesoramiento en la elaboración de este trabajo.

Y a todas las personas que me colaboraron despejando mis dudas en diferentes temas, Ing. Paul Pineda, Ing. Sergio Siles y al Ing. Mauricio Auza.

Muchísimas gracias.

Dedicatoria:

A mis padres y hermanos por su continuo apoyo en todas las actividades que emprendí y por manifestarme tanto cariño y preocupación durante todo este tiempo.

Hoja de aprobación de trabajo de grado.

Elaborado por:

Lic. en Química. Elvira Fania Guisbert Huanca
Responsable

Asesorado por:

Lic. Dalence Stephan Martinic M.Sc.
Asesor Principal CLAS

Autorizado por:

Lic. Benjamín Gossweiler Herrera M.Pr. Coordinador de Investigación Lic. J. Stephan Dalence Martinic M.Sc. Coordinador Académico

LISTA DE CONTENIDO

	Pagina
1 INTRODUCCION.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Planteamiento del problema.....	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivos general.....	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
2 MARCO TEORICO.....	4
2.1 Efectos por metales pesados en la cadena trófica y en el hombre (Usos de agua superficial para consumo humano y riego).....	4
2.2 Modelo de transporte unidimensional con flujo lateral y almacenamiento OTIS.....	5
2.2.1 Modelo de almacenamiento temporal.....	6
2.2.2 Ecuaciones principales que definen a OTIS.....	7
2.2.2.1 Ecuaciones para un estado dinámico.....	8
2.2.2.2 Ecuaciones para un estado estacionario.....	8
2.2.3 Sistema conceptual.....	9
2.2.4 Balance de flujo.....	10
2.2.5 Características Hidráulicas.....	10
2.2.5.1 Flujo estacionario uniforme y no uniforme.....	10
2.2.5.2 Flujo no estacionario no uniforme.....	11
2.2.5.3 Condiciones de borde.....	11
2.2.6 Coeficiente de dispersión y advección.....	13
2.2.7 Reacciones de decaimiento de primer orden.....	14
2.2.8 Adsorción de metales pesados en sedimentos.....	14
2.3 Estimación de parámetros en OTIS-P.....	14
3 MARCO METODOLOGICO.....	15
3.1 Fase pre-campo.....	15
3.2 Fase Campo.....	15
3.2.1 Levantamiento de secciones transversales.....	17
3.2.2 Mediciones de características hidráulicas con trazadores.....	17
3.2.3 Medición de velocidad de flujo.....	18
3.3 Fase gabinete.....	18
3.3.1 Delimitación de la subcuenca y obtención de parámetros físicos del río Antequera.....	18
3.3.2 Calculo de distancias a lo largo del río Antequera.....	19
3.3.3 Definición de entradas para modelos OTIS y OTIS-P.....	19
3.3.4 Fichero Control para OTIS-P, <i>CONTROL.INP</i>	19
3.3.5 Fichero de parámetros, <i>PARAM.INP</i>	19
3.3.6 Fichero de estado estacionario, <i>Q.INP</i>	21
3.3.7 Fichero de datos para estimaciones, <i>DATA.INP</i>	21
3.3.7.1 Tratamiento geoestadístico.....	21
3.3.8 Fichero estadístico, <i>STARPAC.INP</i>	23
3.3.8.1 Estimaciones con OTIS-P para el fenómeno de adsorción.....	23

3.3.8.2	Estimaciones con OTIS-P para el fenómeno de decaimiento de primer orden.....	24
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	24
4.1	Resultados de áreas de sección transversal.....	24
4.2	Resultados de pruebas de trazador de NaCl.....	24
4.3	Modelización de los límites de la subcuenca Antequera.....	25
4.4	Resultados de calculo de valores de distancia del río Antequera mediante ILWIS.....	26
4.5	Resultados de caudales de aforo medidos en campo.....	27
4.6	Tratamiento geoestadístico a datos observados en junio 2007.....	27
4.7	Simulación de Fe y Pb asumiendo flujo dinámico	30
4.8	Simulación de Fe y Pb asumiendo adsorción en canal principal y zona de almacenamiento del cauce del río Antequera con flujo estacionario.....	30
4.8.1	Resultados de estimación de 6 parámetros.....	30
4.8.2	Resultados de estimaciones de 5 parámetros para adsorción de Fe y Pb en 4 tramos.....	31
4.8.3	Adsorción de Fe con 5 parámetros estimados.....	34
4.8.4	Adsorción de Fe con 2 parámetros.....	38
4.8.5	Adsorción de Pb con 5 parámetros estimados.....	41
4.8.6	Adsorción de Pb con 2 parámetros estimados.....	44
4.9	Simulación de Pb asumiendo decaimiento de primer orden en canal principal y zona de almacenamiento del río Antequera.....	44
5	CONCLUSIONES.....	46
6	RECOMENDACIONES.....	47
7	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	47
8	ANEXOS.....	50
8.1	Anexos I.....	52

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1: Mapa de ubicación de la subcuenca Antequera.....	2
Figura 2: a) Solutos entran en pequeñas bolsas de agua y se mueven lentamente b) solutos dejan canal principal y la zona de almacenamiento transitorio.....	6
Figura 3: Descripción del modelo conceptual del canal principal y zona de almacenamiento.....	7
Figura 4: Conformación de tramos y segmentos dentro del sistema estudiado.....	9
Figura 5: Sistema conceptual empleado en cada tramo.....	10
Figura 6: Condiciones de borde agua arriba, definida por C_{bc}	11
Figura 7: Opciones de USBC. USBC puede ser establecida en términos de un perfil de un escalón de concentración, un perfil de un escalón de flujo o un perfil de concentración continuo.	12
Figura 8: Condiciones de borde aguas abajo, expresado como flujo dispersivo.....	13
Figura 9: Río Antequera con poco caudal.....	16
Figura 10: Río Poopó con poco caudal.....	16
Figura 11: Río Antequera que cruza por medio de colas desmontes intervenidos por rescatistas.....	16
Figura 12: Ubicación de secciones transversales a lo largo del río Antequera y división de tramos	20
Figura 13: grafica que muestra la ubicación referencial de los puntos muestreados en junio 2007	22
Figura 14: Curva de Trazadores para el río Antequera, E1 se ubica en la sección A y E2 en B.....	25
Figura 15: Límites de la subcuenca Antequera obtenido con el modelo GeoHECHMS.....	26
Figura 16: Curva que definió el valor de 15000 para distancia limitante usada para las interpolaciones	28
Figura 17: Mapa de interpolación de datos de Fe observados en junio 2007	29
Figura 18: Curvas de concentración observadas de Fe y Pb al largo del cauce ..	29
Figura 19: Datos observados <i>versus</i> simulados de Fe con 2 tramos modelados en estado dinámico.....	30
Figura 20: Resultados de simulación de fe comparados con observados en el mes de junio.....	35
Figura 21: Resultados de simulación de fe comparados con observados en el mes de junio.....	35
Figura 22: concentraciones de Fe adsorbido a la largo del río Antequera.....	36
Figura 23: concentraciones de Fe adsorbido a la largo del río Antequera, a partir de los 1000 m.....	38
Figura 24: Resultados de simulación de fe comparados con observados en el mes de junio- 2 estimaciones.....	39
Figura 25: Resultados de simulación de fe comparados con observados en el mes de junio- 2 estimaciones.....	39

Figura 26: concentraciones de Fe adsorbido a la largo del río Antequera.....	40
Figura 27: concentraciones de Fe adsorbido a la largo del río Antequera, a partir de los 1000 m.....	40
Figura 28: Resultados de simulación de Pb comparados con observados en el mes de junio- 5 estimaciones.....	42
Figura 29: Resultados de simulación de Pb comparados con observados en el mes de junio- 5 estimaciones.....	42
Figura 30: Resultados de simulación de Pb comparados con observados en el mes de junio- 2 estimaciones.....	44
Figura 31: Resultados de simulación de Pb comparados con observados en el mes de junio- 2 estimaciones.....	44
Figura 32: Resultados de simulación de Pb para decaimiento de 1er orden.....	45
Figura 33: Resultados de simulación de Pb para decaimiento de 1er orden.....	45

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro1: Datos de secciones transversales	17
Cuadro2: Datos medidos y cuantificados en junio 2007.....	22
Cuadro3: datos de secciones transversales y sus respectivas áreas.....	24
Cuadro4: Datos de concentraciones de Cl disuelto por estación de trazador en el río Antequera.....	25
Cuadro5: Datos calculados para caudal de aforo en cada tramo.....	25
Cuadro6: Resultados de correlación de tratamiento geoestadístico realizado.....	28
Cuadro7: valores de RHO repetidos durante serie de iteraciones.....	31
Cuadro8: Resultados de iteraciones para 5 estimaciones en adsorción, 4 tramos y Fe.....	32
Cuadro9: Resultados de iteraciones para 2 estimaciones en adsorción, 4 tramos y Fe.....	32
Cuadro10: Resultados de iteraciones para 5 y 2 estimaciones en adsorción, 4 tramos y Pb.....	33
Cuadro11: concentraciones de Fe disuelto y adsorbido a la largo del río Antequera.....	37
Cuadro12: concentraciones de Fe disuelto y adsorbido a la largo del río Antequera-2 estimaciones.....	40
Cuadro13: concentraciones de Pb disuelto y adsorbido a la largo del río Antequera-5 estimaciones.....	43

Resumen

Dentro de la subcuenca Antequera se ubican empresas mineras de gran importancia en extracción de metales como Sinchi Wayra S.A., ubicada aguas arriba del río Antequera; y empresas de mediana y pequeña extracción, sin olvidar a los mineros rescatistas los cuales extraen el mineral sobrante en las colas de desmontes dejados a lo largo del río. Estas empresas de mediana producción y el proceso de rescate, son las que más daño causan al ecosistema al no contar con pasivos ambientales.

Los procesos de transporte de los metales de hierro y plomo (Fe y Pb), liberados por la actividad minera fueron estudiados en el río principal de la subcuenca empleando un modelo unidimensional de transporte y almacenamiento, OTIS, apto para la simulación en ríos de alta montaña donde se observa la fuerte influencia de zonas de almacenamiento o "zonas muertas" como es el caso de presente trabajo.

En el trabajo de campo se realizó la medición de secciones transversales, pruebas de trazador y medición de velocidad de flujo. Estas tareas se vieron limitadas por la destrucción del perfil de sección del río a causa de la fuerte actividad minera y por el poco volumen de agua existente por la época seca (noviembre 2008). Pese a este hecho se pudo realizar la modelización del transporte de Fe y Pb, determinando que el fenómeno de adsorción en los sedimentos se halla preponderante ante las reacciones de decaimiento de 1^{er} orden para Fe. Para Pb, se determinó que los bajos valores de las concentraciones disueltas en agua son una de las limitantes para el modelo OTIS al simular procesos de transporte bajo las condiciones específicas del río Antequera.

Los resultados de Fe mostraron que las concentraciones disueltas se hallan en mayor cantidad en los tramos de 10000 a 14000 m de longitud desde aguas arriba hacia aguas abajo, aproximadamente. Valores corroborados con los datos observados en junio del 2007 por el proyecto CAMINAR.

En estos tramos del río se encuentra gran cantidad de colas de desmontes, los valores altos de concentraciones. Refiriéndose a la adsorción de Fe en sedimentos, se encontró similitud de comportamiento en el tramo de 10000 a 14000 m, donde los valores incrementan ligeramente hasta los 0.27 gFe/Kg sedimento para permanecer constantes y luego descender en concentraciones hasta la salida de la subcuenca.

Por tanto en los tramos de 10000 a 14000 m aproximadamente, es donde existe mayor concentración disuelta de Fe transportada desde las cabeceras de la subcuenca hacia aguas abajo y depositadas en los sedimentos.

Transporte de metales pesados en aguas superficiales de la subcuenca Antequera (Oruro-Bolivia).

1 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

La zona de estudio se halla ubicada entre los 18°16` y 19°44` latitud sur y 66°46` y 66°54` longitud oeste en el departamento de Oruro, zona este del lago Poopó. Forma parte de la zona Altiplánica de Bolivia, de la cordillera Azanaques y de la cuenca Poopó, como se muestra en la figura 1 de ubicación de la subcuenca Antequera. Las alturas oscilan entre 3600 a 4000 m.s.n.m y con pendientes que van desde 1 a 60% de oeste a este.

La subcuenca Antequera tiene un área superficial de 158.3 km² y posee un cauce principal del mismo nombre, el cual es un afluente del lago Poopó. Este cauce tiene una longitud de 18.1 km.

La subcuenca Antequera, según el mapa geomorfológico elaborado por Salinas, (2005) posee suelos, en un gran porcentaje, de origen tectónico con unidades de serranías medias de aspecto masivo, de baja permeabilidad y afloramientos de aguas termales. También se describe depósitos de estaño y plomo, en la cabecera de la subcuenca y descendiendo por el cauce en proximidades de la comunidad Totoral. Depósitos mineros y colas de desmonte se ubican a lo largo del cauce principal a partir de Totoral llegando casi hasta la salida de la subcuenca.

Según estudios realizados en la cuenca Poopó (CAMINAR, 2008; ASDI/SAREC, 2007; Calizaya, 2006; Salinas, 2005) se tiene conocimiento de que la problemática de la contaminación por metales pesados en dicha área es de gran magnitud a causa de los yacimientos de minerales metálicos y no metálicos que se encuentran repartidos en las cordilleras Real, de los Frailes, Azanaques y la Occidental, así como en las serranías del altiplano y en la serranía Intersalar.

Según la descripción hecha por Salinas, (2005) se puede evidenciar que la mayor actividad minera de la subcuenca se halla ubicada en la parte alta y desarrollada por la empresa minera Sinchi Wayra, explotando plomo y estaño (Pb y Sn). Pese a que esta empresa posee sus pasivos ambientales y se encuentran bajo una supervisión de la prefectura del departamento de Oruro, la generación de colas de desmonte, por esta y las empresas de mediana y pequeña extracción de metales, sin olvidar a los mineros rescataistas, hace que se incrementen las concentraciones de metales que se lavan de las colas de desmontes y son transportados por los cauces de agua generando un deterioro enorme al ecosistema.

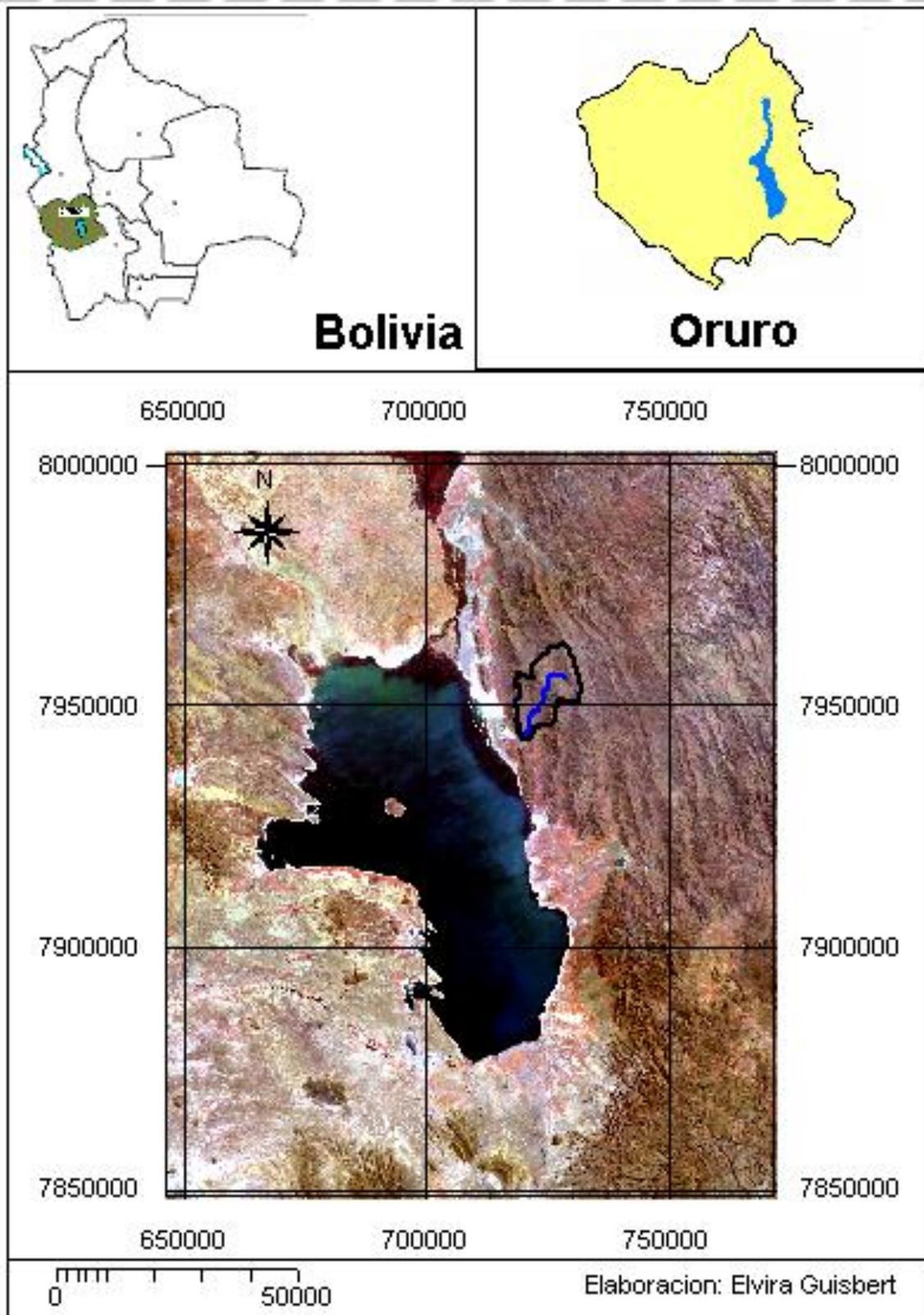


Figura 1: Mapa de Ubicación de la subcuenca Antequera.

1.2 Justificación

A través de la determinación de la dinámica de transporte de metales pesados en aguas superficiales, se puede conocer las zonas donde un determinado metal se deposita y donde no lo hace (en función a pendiente y caudales, principalmente) a lo largo del cauce del río principal, para luego tener una idea precisa sobre la ubicación de las zonas de mayor contaminación por metales pesados y realizar medidas efectivas de remediación en las zonas localizadas.

1.3 Planteamiento del problema

El desconocimiento del movimiento de concentraciones de metales pesados a lo largo de los cauces de ríos y por ende el de las zonas de deposición de concentraciones, producto de la actividad minera, dificulta la generación de bases para el planteamiento de medidas de remediación puntuales, haciendo ineficiente dichas medidas y a los efectos de contaminación cada vez más grandes, afectando a la población y ecosistema en general.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar zonas de deposición de metales pesados por efectos de transporte a lo largo del cauce principal.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estimar coeficientes de dispersión, de intercambio en la zona de almacenamiento, de decaimiento de primer orden en el canal principal y en la zona de almacenamiento, de tasa de adsorción en el canal principal y en la zona de almacenamiento, masa de sedimento accesible por unidad de volumen de agua y coeficientes de distribución, para cada tramo del río Antequera.
- Simular concentraciones de hierro y plomo (Fe y Pb) a lo largo del río principal, mediante el modelo OTIS, asumiendo que existe un *fenómeno químico de adsorción* preponderante y comparar con las observadas durante una misma época para su validación.
- Simular concentraciones de hierro y plomo (Fe y Pb) a lo largo del río principal, mediante el modelo OTIS, asumiendo que suceden *reacciones de decaimiento de primer orden*, preponderantes a cualquier otro fenómeno químico y comparar con las concentraciones observadas durante una misma época para su validación.
- Determinar el transporte y fenómeno químico preponderante en el río Antequera.

2 MARCO TEORICO

2.1 Efectos por metales pesados en la cadena trófica y en el hombre (Usos de agua superficial para consumo humano y riego)

Los metales como el plomo, mercurio, cadmio, níquel, vanadio, cromo, cobre, aluminio, arsénico, hierro y plata son sustancias tóxicas, sí se encuentran en concentraciones altas en función a la norma boliviana 512, (1992).

Muchos de estos elementos son micronutrientes necesarios para la vida de los seres vivos y deben ser absorbidos por las raíces de las plantas o formar parte de la dieta de los animales. Pero cuando por motivos naturales o por la acción del hombre se acumulan en los suelos en altas concentraciones, las aguas o los seres vivos se convierten en medios tóxicos y peligrosos. Echarri, (1998)

La industrialización ha extendido este tipo de contaminación ambiental, por ejemplo la actividad minera que existe en la subcuenca Antequera genera una fuerte contaminación por metales pesados, como se indica en los informes técnicos de ASDI/SAREC 2000-2003 y CAMINAR-2008, (Agencia Sueca de Desarrollo Internacional, Swedish Agency for Research and Developing Countries y Cachtment`s Managements and Mining Impacts in Arid and Semi Arid South America).

El Pb se encuentra en minerales como la galena (sulfuro de plomo, PbS) que se utiliza como fuente de obtención del plomo, la anglosita (sulfato de plomo II, PbSO₄ y la cerusita (carbonato de plomo, PbCO₃), según lo descrito en Domy, (1986).

El Pb es venenoso y tiene efectos tóxicos para las plantas, el plancton y demás organismos acuáticos. Los compuestos de plomo en los peces originan la formación de una película coagulante y provoca alteraciones hematológicas. En el hombre provoca saturnismo, enfermedad que engloba trastornos nerviosos, digestivos y renales. Todos los compuestos de plomo son tóxicos en diferente grado, dependiendo de su naturaleza química y grado de solubilidad de cada compuesto, los más tóxicos son los compuestos orgánicos, declarado por la CDC en 1991.

La tasa a la que el Pb es absorbido depende de la forma química, física y también de las características físicas de la persona expuesta. Este metal se acumula en los tejidos vivos sin sufrir degradación, siendo el motivo por el cual una vez que ingresa en el cuerpo humano se va acumulando hasta llegar a niveles tóxicos y letales causando enfermedades como proteinuria, aminosaciduria, fosfaturía y glucosuria, entre otras, citados por Carmine Pascuzzo, (2008).

Para el caso de Fe en áreas mineras, las capas superiores de suelos minerales presentan concentraciones elevadas de metales y entre ellos esta el hierro. Al hierro, en general, no se lo considera como metal toxico, ya que generalmente se encuentra en formas no solubles, pero cuando se halla en formas solubles y en grandes

cantidades puede ocasionar cuadros convulsivos, como oliguria y anuria, entre otras enfermedades (Pascuzzo, 2008).

Los límites permisibles, para cuerpos de agua aptos para consumo humano, dados por la norma boliviana 512 (NB512) para plomo y hierro son de 0.01 y 0.3 mg/L. Por encima de estos valores se los considera tóxicos para la salud.

2.2 Modelo de transporte unidimensional con flujo lateral y almacenamiento OTIS

Los modelos matemáticos unidimensionales son los modelos más sencillos que se pueden tener debido a que el número de ecuaciones a resolver es mínimo y el conjunto de datos requeridos para describir un flujo unidimensional es usualmente mucho menor que los requeridos para describir flujos bidimensionales y tridimensionales (Molerio, 2007).

OTIS es un modelo unidimensional de simulación matemática utilizado para caracterizar la evolución y transporte de solutos transportados por agua en arroyos y ríos (OTIS y OTIS-P, 1998).

La ecuación básica que sostiene el modelo es la ecuación de advección-dispersión (ADE) con términos adicionales para considerar el almacenamiento transitorio, el flujo lateral, la descomposición de primer orden y la adsorción. Esta ecuación y las ecuaciones asociadas para describir el almacenamiento transitorio y la adsorción se resuelven utilizando una solución Crank-Nicolson por diferencias finitas (OTIS y OTIS-P, 1998).

OTIS puede ser usado junto con datos de experimentos de campo con trazadores para cuantificar los parámetros hidrológicos que afectan al transporte de solutos. Esta aplicación habitualmente implica una aproximación por tanteo y error en donde los parámetros estimados son ajustados para obtener una aceptable concordancia entre las concentraciones de trazador simuladas y observadas (OTIS y OTIS-P, 1998).

OTIS-P, una versión modificada de OTIS, combina la solución de la ecuación básica con un programa de regresión no lineal. OTIS-P determina un conjunto óptimo de estimaciones de parámetros que minimiza el cuadrado de las diferencias entre las concentraciones observadas y estimadas automatizando, de este modo, el proceso de estimación de parámetros (OTIS y OTIS-P, 1998).

Es importante destacar que en este modelo matemático se considera la ecuación ADE, la cual describe los fenómenos de transporte de solutos unidimensionalmente, se incorpora otro modelo unidimensional de almacenamiento temporal (TS) que corrige las limitaciones de ADE, es decir, OTIS puede describir adecuadamente el transporte en corrientes muy irregulares, tales como ríos de montaña o en cuerpos de agua caracterizados por zonas muertas. Por tanto OTIS es un modelo de transporte que incorpora el efecto de solutos atrapados en “zonas muertas” o “zonas

de almacenamiento” afectando a la dispersión longitudinal en la corriente, tal como explica Camacho y Bitar (2008).

2.2.1 Modelo de almacenamiento temporal

Lo citado en esta sección fue extraído del manual de OTIS y OTIS-P publicado el año de 1998.

Por almacenamiento temporal se entiende la detención temporal de solutos en pequeños remolinos y bolsas estancadas de agua, que permanecen relativamente estacionarios frente al movimiento más rápido de las aguas cerca del centro del canal, (a), además, porciones significantes del flujo pueden moverse a través de la grava gruesa del lecho de la corriente y las áreas porosas dentro de las orillas (b). El tiempo de viaje para los solutos transportados a través de estas áreas porosas puede ser significativamente mas largo que el de aquellos que viajan dentro de la columna de agua. Estas bolsas de agua y las áreas porosas del lecho son las dos zonas que contribuyen al almacenamiento transitorio, como se muestra en la figura 2.

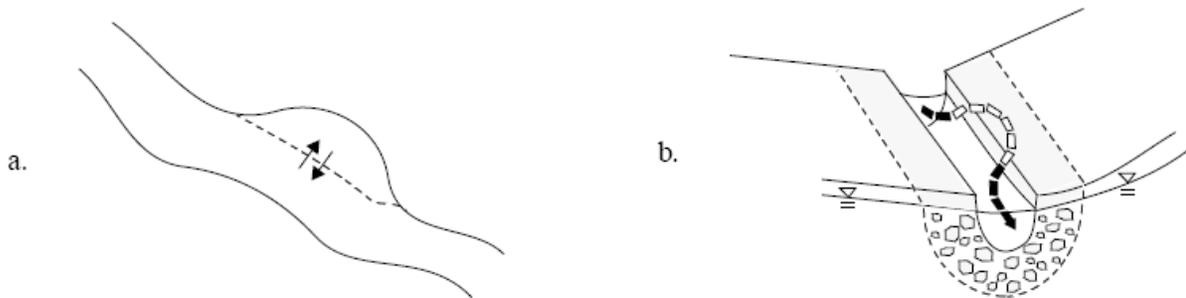


Figura 2: a) solutos entran en pequeñas bolsas de agua y se mueven lentamente b) solutos dejan canal principal y la zona de almacenamiento transitorio. (Fuente: OTIS, 1998)

El modelo se basa en la definición de las ecuaciones de balance de masa para las dos áreas conceptuales definidas como: *canal principal* y *zona de almacenamiento*.

La figura 3 describe los procesos que afectan a la concentración de solutos en el canal principal y en la zona de almacenamiento.

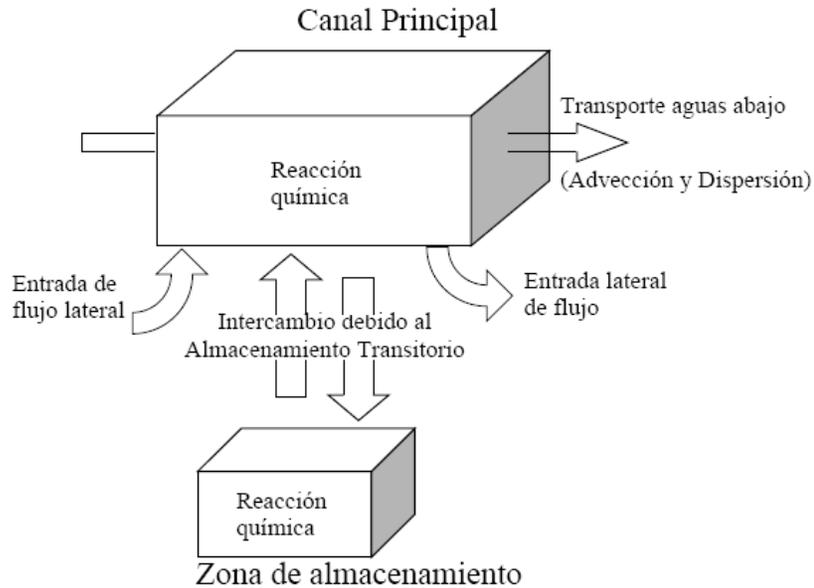


Figura 3: Descripción del modelo conceptual del canal principal y zona de almacenamiento. (Fuente: OTIS y OTIS-P, 1998)

Dentro del canal principal, los solutos son transportados aguas abajo, por advección y dispersión, estos procesos no están incluidos en la zona de almacenamiento, donde el transporte aguas abajo es despreciable. El flujo lateral representa el agua adicional que entra al canal principal como flujo superficial, flujo sub-superficial y descarga de agua subterránea. El flujo lateral saliente representa el agua que sale del canal principal hacia la cuenca circundante.

El canal principal y la zona de almacenamiento están relacionados a través del proceso de almacenamiento transitorio.

El intercambio de masa de soluto entre el canal principal y la zona de almacenamiento, atribuible al almacenamiento transitorio, se modela como un proceso de transferencia de masa de primer orden. Las reacciones químicas se producen dentro del canal principal y de la zona de almacenamiento

2.2.2 Ecuaciones principales que definen a OTIS

El supuesto básico utilizado dentro de la derivación de las ecuaciones es que la concentración de soluto solo varía en la dirección longitudinal (es decir que la concentración no varía con la profundidad o la anchura), A partir de este supuesto, las ecuaciones se desarrollan para un sistema unidimensional que consiste en una serie de segmentos de corriente (volúmenes de control). Cada segmento incluye el canal principal y la zona de almacenamiento, dos áreas conceptuales en las que se conserva la masa (OTIS y OTIS-P, 1998).

Las secciones 2.2.2.1 y 2.2.2.2 fueron extraídas del manual de OTIS y OTIS-P, (1998).

2.2.2.1 Ecuaciones para un estado dinámico

Considerando los procesos de adsorción, reacciones de decaimiento de primer orden y el fenómeno de advección y dispersión, se hace uso de la siguiente ecuación aplicable a solutos no conservativos donde sus características varían en el tiempo y el espacio.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[AD \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (1)$$

La ecuación (1) es ampliamente utilizada para modelar el transporte de sustancias disueltas en corrientes y se conoce con el nombre de ecuación de advección – dispersión (ADE). De esta ecuación se obtiene las siguientes:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \zeta(C) + \rho\lambda(C_{sed} - K_d C) - \lambda C \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = S(C_s) + \hat{\lambda}_s(\hat{C}_s - C_s) - \lambda_s C_s \quad (3)$$

Donde:

$\zeta(C)$ y $S(C_s)$ = procesos físicos en el canal principal y la zona de almacenamiento

C = concentración de soluto en canal principal [M/L^3]

C_s = concentración de soluto en la zona de almacenamiento [M/L^3]

t = tiempo [T]

\hat{C}_s = concentración base de soluto en la zona de almacenamiento [M/L^3]

C_{sed} = concentración de soluto sobre el sedimento del lecho [M/M]

K_d = coeficiente de distribución (partición) [L^3/M]

λ = coeficiente de descomposición de primer orden en el canal principal [1/T]

λ_s = coeficiente de descomposición de primer orden en zona de almacenamiento [1/T]

ρ = masa de sedimento accesible/volumen de agua [M/L^3]

Donde C_{sed} , concentración de sorbato en el lecho, esta regida por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \lambda(K_d C - C_{sed}) \quad (4)$$

2.2.2.2 Ecuaciones de estado estacionario

Las ecuaciones mencionadas pueden simplificarse si se considera un estado estacionario de flujo, es decir, considerar que los parámetros del modelo, variables de flujo y condiciones de frontera se mantienen constantes por un periodo de tiempo indefinido, alcanzando el sistema un estado de equilibrio donde las concentraciones no varían con el tiempo en un punto dado.

$$0 = \zeta(C) + \rho\hat{\lambda}(C_{sed} - K_d C) - \lambda C \quad (5)$$

$$C_s = \frac{\alpha AC + \hat{\lambda}_s A_s \hat{C}_s}{\alpha A + \lambda_s A_s + \hat{\lambda}_s A_s} \quad (6)$$

$$C_{sed} = K_d C \quad (7)$$

Donde:

A= área de sección transversal del canal principal [L²]

A_S = área de sección transversal de zona de almacenamiento [L²]

α = coeficiente de intercambio en la zona de almacenamiento [1/T]

La ecuación (5) rige el estado estacionario para el canal principal y la (6) y (7) a las concentraciones en la zona de almacenamiento y el lecho del cauce, respectivamente.

Para mayor información revisar manual de OTIS, 1998.

2.2.3 Sistema conceptual

Lo citado en esta sección fue extraído del manual de OTIS y OTIS-P, (1998).

Antes de empezar a definir las entradas para el modelo es necesario definir la construcción del sistema conceptual sobre el cual se aplica y resuelven las ecuaciones arriba mencionadas.

La figura muestra que todo el cauce principal de halla dividido en n-tramos (*NREACH*) de una longitud determinada por el usuario y que no precisamente es la misma para cada uno (*RCHLEN*).

Así mismo, cada tramo se halla dividido en n-segmentos (*NSEG*) definidos por el usuario de una longitud (*DELTA*) constante asignada por el sistema (*DELTA=RCHLEN/NSEG*)

Sistema conceptual - Tramos y segmentos

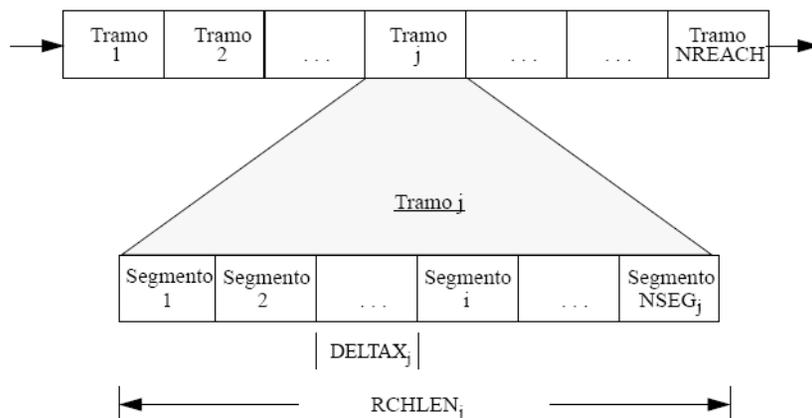


Figura 4: conformación de tramos y segmentos dentro del sistema estudiado (Fuente: guía OTIS y OTIS-P, 1998)

2.2.4 Balance de flujo

Lo citado en esta sección fue extraído del manual de OTIS y OTIS-P, (1998).

El concepto de balance de flujo se considera dentro del modelo. Como se observa en la figura 5 dicho balance se hace en cada tramo considerando flujos laterales de entrada y salida.

El flujo lateral representa el agua adicional que entra al canal principal como flujo superficial, flujo sub-superficial y/o descarga de agua subterránea. El flujo lateral saliente representa el agua que sale del canal principal hacia la cuenca circundante.

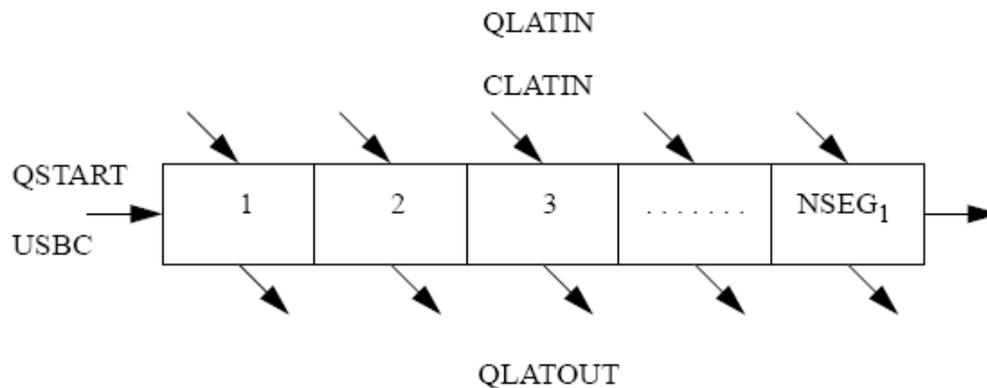


Figura 5: Sistema conceptual empleado en cada tramo. (Fuente: guía OTIS y OTIS-P, 1998).

Como se muestra en la figura el flujo lateral, Q_{LATIN} , representa el flujo que entra al canal como flujo superficial, flujo sub-superficial, y/o como caudal de agua subterránea. Este flujo lleva consigo una concentración de soluto, CL_{LATIN} . La última variable, Q_{LATOUT} , es un término de flujo de salida lateral que representa una pérdida de agua del canal de la corriente.

2.2.5 Características Hidráulicas

Existen diversas condiciones de flujo, como ser, flujos variables espacialmente y temporalmente (OTIS y OTIS-P, 1998).

2.2.5.1 Flujo estacionario uniforme y no uniforme

Flujo estacionario es definido como aquel que no cambia con el tiempo y flujo uniforme, aquel con una superficie de agua paralela con la pendiente del lecho. Flujo no uniforme tiene una descarga constante pero la pendiente de la superficie de agua es variable según como sea la entrada al reservorio o la cercanía a una caída de agua (Viessman. y Lewis, 1996).

Bajo el régimen de flujo estacionario, parámetros del modelo tales como flujo lateral y área de la sección transversal, permanecen constantes con respecto al tiempo (OTIS y OTIS-P, 1998).

2.2.5.2 Flujo no estacionario no uniforme

Flujo no-estacionario involucra parámetros del modelo que cambian en el tiempo. Esta opción se selecciona típicamente cuando el modelo de transporte de solutos se utiliza en conjunto con un modelo de tránsito de caudales que proporciona flujos laterales, caudales y áreas de la sección transversal variables en el tiempo. Muy pocas aplicaciones de flujo no-estacionario se han llevado al cabo a la fecha (guía OTIS, 1998).

2.2.5.3 Condiciones de Borde

Se definen como un conjunto de condiciones específicas que describen y definen los límites de un sistema y son empleados para la simulación de procesos físicos que suceden en las fronteras de dicho sistema (Viessman. y Lewis, 1996).

En este caso, dos condiciones de borde (contorno) deben ser especificadas para resolver las ecuaciones diferenciales del modelo. Para el caso de un canal de corriente unidimensional, estas condiciones de frontera (contorno) se aplican a las fronteras aguas arriba (*USBC*) y aguas abajo (*DSBOUND*), (OTIS y OTIS-P, 1998).

La condición de borde aguas arriba se define en términos de una concentración fijada, (C_{bc}), en la frontera aguas arriba, como muestra la figura 6. Por lo tanto esta condición de frontera representa la concentración de soluto que está entrando por la parte superior de la corriente del sistema modelado. Para las soluciones en las ecuaciones de variable temporal, las condiciones de frontera (contorno) aguas arriba, pueden variar a lo largo del tiempo (OTIS y OTIS-P, 1998).

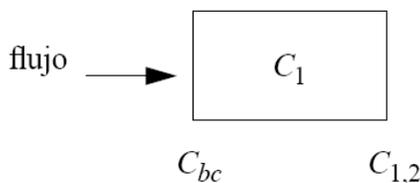


Figura 6: Condiciones de borde aguas arriba, definida por C_{bc} . (Fuente: OTIS, 1998)

La interpretación de USBC depende del tipo de condición de frontera de aguas arriba especificada. Pueden especificarse tres tipos de condiciones de frontera tal como se observa en la figura 7 (OTIS y OTIS-P, 1998).

Un perfil de concentración consistente en un pulso de duración finita se impone en la frontera de aguas. Bajo esta opción, USBC corresponde a la concentración de la frontera de aguas arriba, C_{bc} . (OTIS y OTIS-P, 1998).

Para un perfil de concentración consistente en un pulso de duración finita Cbc se fija inicialmente en el primer valor de frontera ($USBC_j$) y es subsecuentemente actualizada (en $USBC_{j+1}$, $USBC_{j+2}$,...) a los tiempos correspondientes ($USTIME_{j+1}$, $USTIME_{j+2}$,...) (OTIS y OTIS-P, 1998).

Un perfil de flujo de masa de duración finita se impone en la frontera de aguas arriba. Bajo esta opción, $USBC$ corresponde a $QCbc$, donde Q es el caudal en la frontera de aguas arriba. Para un perfil de flujo de masa de duración finita, el primer valor de frontera ($USBC_j$) se divide por Q con el fin de obtener un valor inicial de Cbc . La concentración en la frontera de aguas arriba se actualiza subsecuentemente a los tiempos correspondientes ($USTIME_{j+1}$, $USTIME_{j+2}$,...) (OTIS y OTIS-P, 1998).

Un perfil continuo de concentración se impone en la frontera de aguas arriba. Bajo esta opción, Cbc se actualiza para cada intervalo de tiempo del modelo. El valor asignado a Cbc se determina mediante interpolación lineal utilizando los valores especificados de $USBC$. Para habilitar la interpolación, el tiempo de la última condición de frontera ($USTIMENBOUND$) debe ser mayor que o igual a, el tiempo de simulación final ($TFINAL$) (OTIS y OTIS-P, 1998).

En contraste con la condición aguas arriba, la condición de frontera aguas abajo no es una concentración fijada sino un flujo dispersivo fijado (OTIS y OTIS-P, 1998).

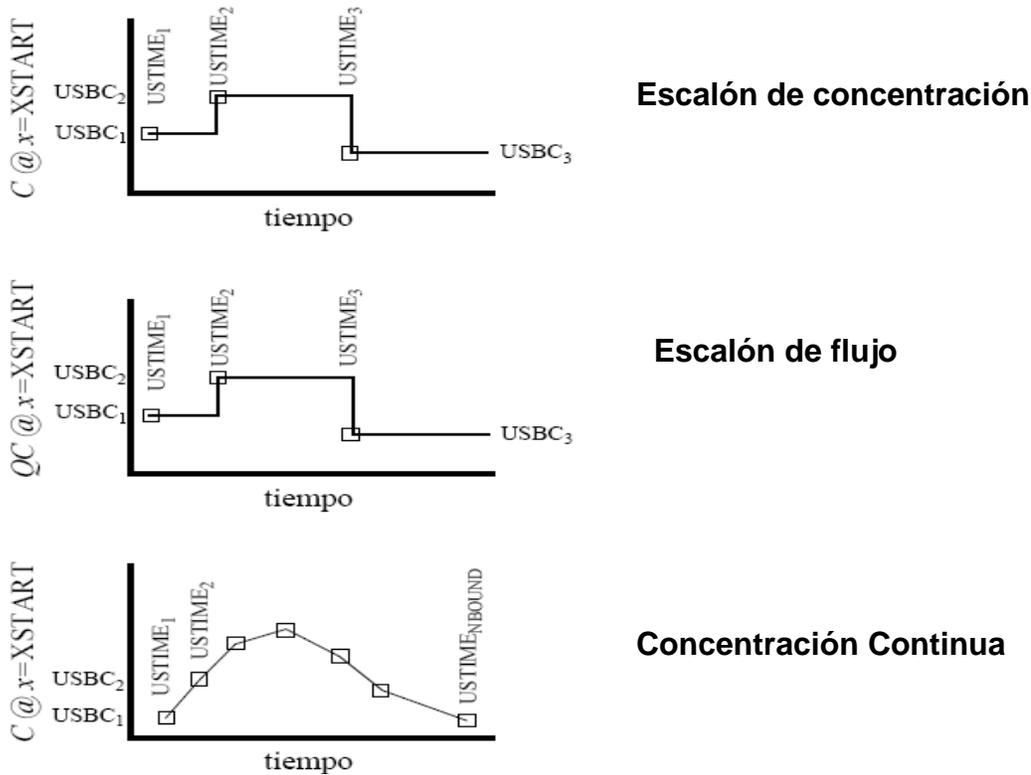


Figura 7: Opciones de USBC. USBC puede ser establecida en términos de un perfil de un escalón de concentración, un perfil de un escalón de flujo o un perfil de concentración continuo. (Fuente: OTIS, 1998)

Para implementar la condición de frontera aguas abajo se define un flujo dispersivo en la interfaz entre los segmentos i e $i+1$. Aquí en subíndice i se refiere al último segmento del sistema modelado, e $i+1$ se refiere a un segmento ficticio adyacente al último segmento. El flujo dispersivo se define como (OTIS y OTIS-P, 1998):

$$\left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{i, i+1} = DSBOUND$$

Donde $DSBOUND$ es un valor suministrado por el usuario para el flujo dispersivo. Observe que si $DSBOUND$ se establece igual a cero, la ecuación es una condición de frontera (contorno) de gradiente nulo. Esto implica que la concentración en el segmento i es igual a la del segmento $i+1$. La aplicación de la condición de frontera (contorno) aguas abajo se muestra en la figura 7 (OTIS y OTIS-P, 1998).

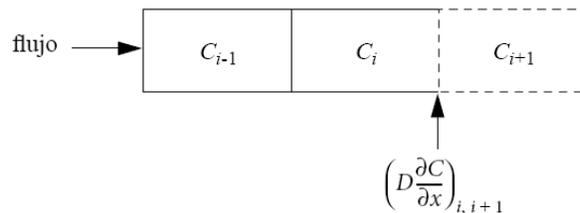


Figura 8: Condiciones de borde aguas abajo, expresado como flujo dispersivo. (Fuente: OTIS, 1998)

2.2.6 Coeficiente de Dispersión y Advección

La dispersión y advección son los principales mecanismo de transporte que deben modelarse para sustancias vertidas a una corriente según Camacho y Bitar, (2008).

La advección resulta de un flujo que es unidireccional y no cambia las propiedades de la sustancia que se transporta. Por medio de ese proceso el contaminante se mueve de un lugar a otro, manual QUAL2K, (2007).

La dispersión longitudinal es el segundo mecanismo de transporte, tiene origen en la diferencia de las magnitudes del campo de las velocidades de la corrigen y en la dispersión generada por irregularidades del fondo de las orillas y remolinos de gran escala (dispersión turbulenta). La dispersión turbulenta se ha asemejado tradicionalmente al mecanismo difusivo representado por la ley de Fick. Que puede ser representada como (OTIS y OTIS-P, 1998):

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \partial A \tag{8}$$

Que indica que el flujo masivo que atraviesa, por difusión molecular, una sección transversal ∂A por unidad de tiempo es directamente proporcional al gradiente de concentración en la dirección que se considera X ; el signo negativo indica que el flujo se produce en sentido decreciente de las concentraciones; el factor de

proporcionalidad D se denomina coeficiente de difusión molecular (OTIS y OTIS-P, 1998).

Esta suposición es estrictamente válida solamente para condiciones de turbulencia homogénea y estacionaria

El balance de masa incluyendo la dispersión longitudinal entre las secciones de volumen de control resulta en la ecuación (1) mostrada anteriormente, donde D es el coeficiente de dispersión longitudinal (OTIS y OTIS-P, 1998).

2.2.7 Reacciones de decaimiento de primer orden

La mayoría de metales pesados son sustancias conservativas en cuanto a que la cantidad total de metales no disminuye por procesos como biodegradación, fotólisis o decaimiento radioactivo. La ausencia de estos procesos simplifica su modelación, según Camacho y Bitar, (2008)

2.2.8 Adsorción de metales pesados en sedimentos.

Los metales pesados son sustancias tóxicas las cuales tienen la particularidad de presentarse tanto en forma disuelta en el agua como en forma particulada no disuelta adsorbida al sedimento y al material en suspensión. Los metales pesados están íntimamente ligados con el destino de la materia sólida, por esto, los mecanismos de adsorción y sedimentación o resuspensión afectan de manera notoria en su transporte, según Camacho y Bitar, (2008)

2.3 Estimación de parámetros en OTIS-P

Lo citado en esta sección es lo explicado en el manual de OTIS y OTIS-P, (1998).

La estimación de parámetros es un objetivo de muchos estudios de transporte de solutos. Generalmente se parte de un conjunto de concentraciones medidas y se desea determinar un conjunto de valores de parámetros que describan adecuadamente al sistema bajo estudio.

Los estudios de dilución de trazadores como los de Broshears, (1993), por ejemplo, pretenden cuantificar los parámetros hidrológicos que caracterizan el transporte físico y la mezcla (Q , A , A_s , α , D).

La estimación de parámetros envuelve a menudo un procedimiento de tanteo y error, en donde las estimaciones de los parámetros se ajustan manualmente durante una serie de simulaciones para obtener una igualdad aceptable entre las concentraciones simuladas y observadas. Una alternativa a la aproximación por tanteo y error es utilizar técnicas de estimación de parámetros como la regresión no lineal por mínimos cuadrados (NLS) que automáticamente determinan un conjunto de estimaciones óptimas de los parámetros.

El objetivo del NLS es determinar el vector de parámetros estimados que minimiza la suma de los errores al cuadrado (*RSS*).

OTIS-P emplea una técnica ajustada de NLS descrita por Dennis, *et. al* (1981) que minimiza *RSS* usando un procedimiento iterativo. Dentro del procedimiento iterativo, los estimados de los parámetros se mejoran hasta que se alcance uno de dos criterios de convergencia.

La convergencia puede estar basada en el relativo cambio en los parámetros o en el cambio en la suma de los cuadrados de los residuales, donde según los criterios de convergencia especificados por el usuario (*STOPP* y *STOPSS*) se realiza un test de convergencia. Si se satisfacen dichos criterios los resultados han convergido y el estimado final de los parámetros queda dado por los valores de la última iteración. Si no se cumple ninguna de las ecuaciones mencionadas, comienza una nueva iteración.

3 MARCO METODOLOGICO

3.1 Fase pre-campo

Dentro de esta fase se procedió a la recopilación de datos de fuentes secundarias como ser datos de concentraciones de Fe, Pb y Cl (Cloro) disueltos en aguas superficiales de los meses de junio, septiembre, noviembre y diciembre del año 2007 dentro el río Antequera (Proyecto CAMINAR-IIQ-UMSA; Instituto de Investigaciones Químicas - Universidad Mayor de San Andrés).

También se procedió a la recopilación de información de caudales de salida mensuales del 2001 y 2002, mapas de curvas de nivel cada 20 m de la subcuenca digitalizados de la carta topográfica de Oruro, un modelo de elevación digital SRTM de 90 m de resolución espacial y un mapa de la red de drenaje generado por el Proyecto ASDI-SAREC- IHH-UMSA (Instituto de Hidráulica e Hidrología de la universidad mayor de San Andres, La Paz, Bolivia).

Algunos inconvenientes que hubo en esta fase fue, por un lado, la inexistencia de datos de caudal de las subcuencas Poopó, Pazña y Urmiri y por otro la falta de entrega a tiempo de datos de caudal de aforo de los años 2006 y 2007 de la subcuenca Antequera por parte de SENAMHI de La Paz, limitando el trabajo a la subcuenca Antequera y a datos caudal de los años de 2001 y 2002 años que no pertenecen a la época de los datos observados por el proyecto CAMINAR, que son con los que se hará la modelización.

3.2 Fase Campo

Todo el trabajo de campo que estaba previsto hacerse en las subcuenca Poopó, Pazña, Urmiri y Antequera, se vió reducido en la visita a campo donde se pudo evidenciar que por la época seca, característica del mes de noviembre del año

hidrológico de Bolivia, no existía agua en el cauce principal y/o la poca que existía era insuficiente para desarrollar las pruebas requeridas. Figuras 9, 10 y 11.



Figura 9: Río Antequera con poco caudal.



Figura 10: Río Poopó con poco caudal.



Figura 11: Río Antequera que cruza por medio de colas de desmontes intervenidos por rescatistas.

Otro aspecto que limitó el trabajo de campo fue la gran alteración del cauce original del río Antequera como consecuencia de la gran actividad minera que existe en la zona, destruyendo los perfiles de secciones transversales originales del 2007 y años pasados, convirtiéndolos en zona planas de depósitos de sedimentos donde el agua debe buscar un curso diferente al de años pasados y crear nuevos perfiles de sección. Por otro lado, en la subcuenca Poopó existe un lecho de río con secciones mas definidas ya que la actividad minera no es tan fuerte como en Antequera. Sin embargo en la fecha de la visita a campo se encontró con el río intervenido por una ruta secundaria, habilitada de manera temporal, destruyendo los perfiles de sección del río.

Es así, que por la escasez de agua, la inexistencia de secciones, y la falta de datos de caudal, fue imposible trabajar en las subcuencas Pazña, Poopó y Urmiri como se había planificado originalmente, limitando el trabajo a la medición en los pocos lugares aptos para realizar el mismo dentro de la subcuenca de Antequera.

3.2.1 Levantamiento de secciones transversales

Se trabajó con una estación total LEICA TPS 700 que consta de un taquímetro electrónico TC 705.

La cabecera del río Antequera se halla con acceso restringido por la empresa minera Sinchi Wayra, ubicada dentro el pueblo Bolívar y sobre las cabeceras de cuenca. Esta empresa capturó las aguas del cauce para su tratamiento y empleo de la misma para el funcionamiento de la mina.

Es así, que la medición más aproximada aguas arriba se hizo en la coordenada geográfica UTM de 725257 norte y 7955934 este a 3118 m aguas abajo de la cabecera.

A partir de este punto de logró medir 3 secciones más, detalladas en el Cuadro 1.

Cuadro1: Datos de secciones transversales.

Sección	Descripción	X (norte)	Y (este)
A	Aguas abajo de comunidad Martha	724217	7953618
B	Aguas abajo de laguna artificial que llega al río, Avicaya.	721884	7948244
C	Puente Pazña. Salida de subcuenca Antequera	720408	7941884
D	Aguas arriba de la subcuenca Antequera	725257	7955934

El calculo de área de sección transversal se lo hizo en la programa AUTOCAD 2005. Los datos obtenidos se muestran en la sección 4.

3.2.2 Mediciones de características hidráulicas con trazadores

Las pruebas de trazador se realizaron empleando cloruro de sodio (NaCl) ó sal comercial.

El lugar donde se realizo la prueba fueron los mismos donde se midió secciones transversales, en este caso, por falta de agua solo se la realizó en las secciones A y B, donde existía una altura de agua y un flujo relativamente apto para la realización de esta prueba.

Una persona se ubicó aguas arriba de la sección a una distancia determinada que cumple con las condiciones de un tramo y flujo longitudinal y relativamente constante sin alteraciones de zonas de remolinos que alteren el flujo normal del NaCl transportado por el agua. La segunda persona aguas abajo, en un punto fijo, recolectó las muestras cada 5 segundos, aproximadamente, en botellas de plástico

de 100 ml de volumen, previamente lavadas y preparadas para la respectiva toma de muestra de Cl, según se especifica en el manual de guía operativa GEMS/AGUA, (1992).

El número de muestras tomadas en cada sección se definió a través de la medición de conductividad antes de verter el NaCl, durante el vertido y su transporte, es decir, el valor de conductividad debía retornar al valor inicial antes del vertido para detener la prueba. Mientras esta estabilidad inicial no ocurriera se continuó tomando muestras de agua. El número de muestras fue de 29, las cuales fueron analizadas con equipos y reactivos de los laboratorios de química del IIQ-UMSA-proyecto CAMINAR.

La metodología de análisis empleada fue por titulación volumétrica, descrita en APHA, *et. al.* (1992), "Métodos Normalizados" para el análisis de aguas potables y residuales. Se escogió esta técnica ya que las concentraciones de Cl son bastante altas para ser analizadas por métodos espectrofotométricos UV-VIS.

3.2.3 Medición de velocidad de flujo

La velocidad se midió empleando un flotador y soltándolo sobre el agua desde un punto hasta otro donde la dirección del flujo sea casi en línea recta a lo largo del cauce. Se midió varias veces el tiempo que tarda el flotador en recorrer una distancia constante. Los datos se midieron en las cuatro secciones. Los resultados del cálculo de estas mediciones de detallan en la sección 4.

3.3 Fase gabinete

3.3.1 Delimitación de la subcuenca y obtención de parámetros físicos del río Antequera.

Para realizar este trabajo se contó con un DEM de 90 m de resolución espacial como entrada para la modelización de la subcuenca Antequera empleando el modelo GeoHechMS v1.1, herramienta de la plataforma ArcView GIS 3.2.

El procedimiento seguido fue el descrito en la guía dada por Parodi, (2004) el cual consta en hacer un tratamiento digital al DEM para adquirir la información geométrica necesaria en el modelo hidrológico y comparar estos resultados con otros obtenidos de una digitalización manual a partir de curvas de nivel.

En base a la red de drenaje obtenida se generó algunas entradas para la modelización de transporte, es decir, distancia del tramo principal, ubicación, sobre el cauce de las secciones transversales medidas en campo, ubicación de los puntos de muestreo de Fe y Pb del año 2007, interpolación de concentraciones de Fe y Pb sobre el cauce de río, determinación de distancia de cada tramo a modelar y sus respectivos segmentos.

3.3.2 Cálculo de distancias a lo largo del río Antequera

Para realizar este cálculo se procedió empleando el mapa de red de drenaje generado a través de la modelización de los límites de la subcuenca empleando Geo HECHMS.

A través de este mapa se creó un mapa peso con operación de condicionales dando valores de 1 y -1 a los píxeles de la red de drenaje y fuera de la red de drenaje, respectivamente. Se empleó como mapa fuente al mapa raster de la red y se calculó el mapa de distancia del río Antequera a través de la operación *distance calculation* del programa ILWIS versión 3.4.

3.3.3 Definición de entradas para modelo OTIS y OTIS-P

El modelo OTIS contiene tres archivos en los que se deben registrar las entradas. No se dará gran detalle de los mismos, ya que estos se encuentran en manual de OTIS que es de acceso libre, al igual que la extensión OTIS-P. Por lo que solo se describirá el como se calcularon las entradas para nuestra área de estudio.

3.3.4 Fichero Control para OTIS-P, *CONTROL.INP*

Dado que no se contó con muchos parámetros de entrada para la modelización debido al tiempo limitado para la elaboración de este trabajo, el cual impedía la determinación de los mismos en laboratorio, como ser, *ALPHA*, coeficiente de intercambio en la zona de almacenamiento; *RHO*, masa de sedimento accesible por unidad de volumen y *KD*, coeficiente de distribución. Fue necesario hacer uso de la extensión OTIS-P, para ello se llenó la ficha de control OTIS-P, donde se especificó el tipo de fenómeno a modelar (adsorción o decaimiento de primer orden) y los nombres de los archivos de salida, como se muestra en el anexo 1.

3.3.5 Fichero de Parámetros, *PARAM.INP*

Este fichero fue llenado simulando un flujo estacionario uniforme, la existencia de zona de almacenamiento dentro todo el cauce principal, división de 4 tramos del cauce (por las 4 secciones medidas en campo), donde cada tramo posee 6, 12, 8 y 8 segmentos, respectivamente, desde aguas arriba hacia agua abajo.

Las distancias de cada tramo y sección fueron de 3118, 6251, 4493 y 4269 m, respectivamente (ver fichero *PARAM.INP* en el anexo 1).

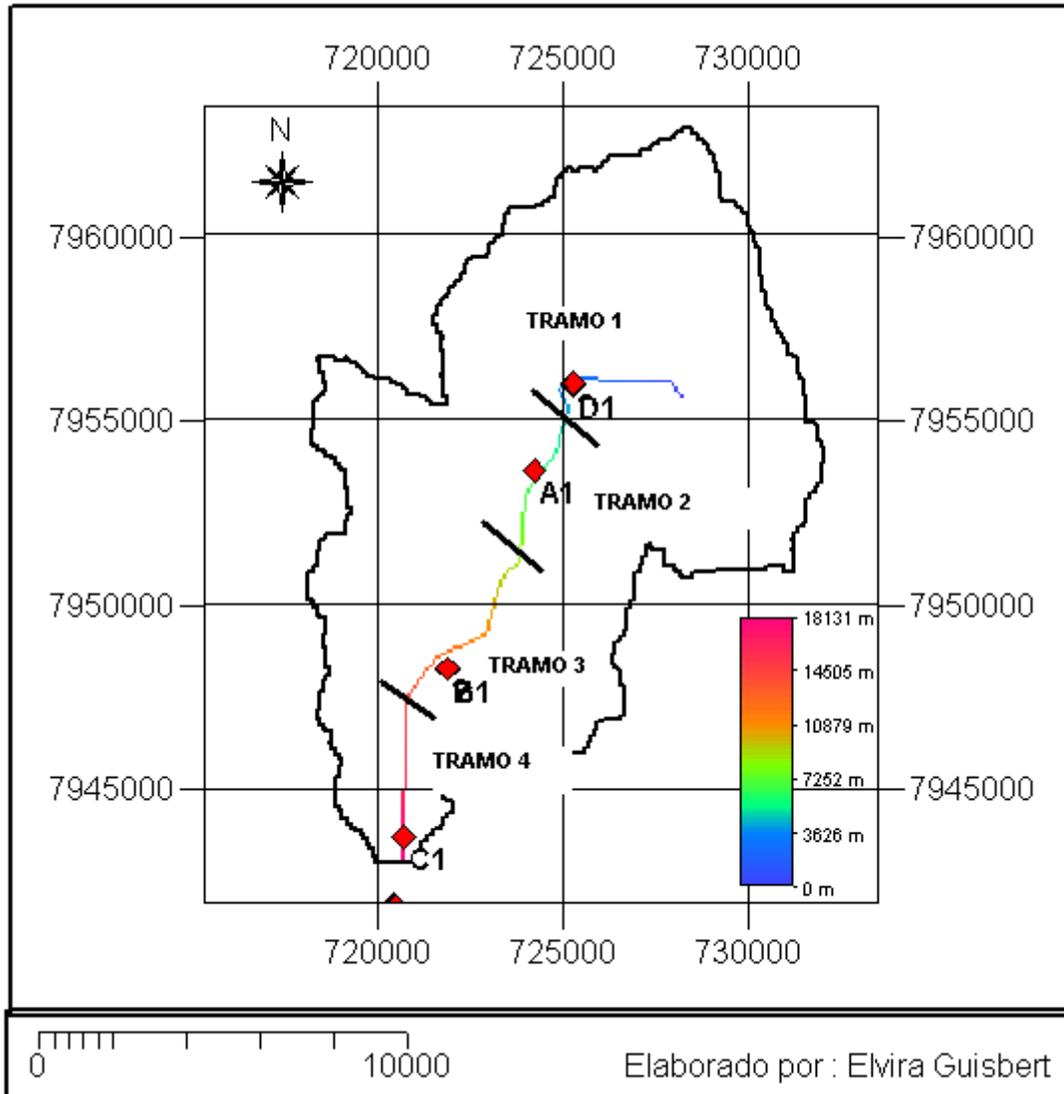


Figura 12: Ubicación de secciones transversales a lo largo del río Antequera y división de tramos.
(Fuente: Elaboración propia)

Para cada tramo se estimaron valores de DISP, AREA2 y ALPHA. En los tramos 1 y 2 no se evidenció en campo la existencia de zonas de almacenamiento por lo que el valor de AREA2 es cero. (Ver ficheros de salida en anexo I).

Se simuló primero un fenómeno de adsorción, para lo cual se estimó LAMHAT, LAMHAT2, RHO y KD. (Ver ficheros de salida param.out en anexo I).

Se solicitó al sistema 14 puntos de impresión de datos de concentración de cada metal, tanto en el canal como en la zona de almacenamiento. Las distancias se detallan en el fichero *PARAM.INP* mostrado en anexo 1

Se definieron las condiciones de frontera aguas arriba (*USBC*) simulando una concentración continua, como se explicó en la sección 2.2.5.3. Para ello los datos de

entrada fueron los recolectados en la estación E1 de trazador, mostrado en la sección.3.2.2.

3.3.6 Fichero de estado estacionario, *Q.INP*

Este fichero tiene como entrada datos de caudal de aforo para cada tramo.

Los datos de aforo fueron los obtenidos como resultado del cálculo en base a área de sección mojada y velocidad de flujo, como se muestra en la sección 4.

Estos valores fueron obtenidos mediante la fórmula de $Q = \text{Área (m}^2) \times \text{Velocidad de flujo (m/s)}$.

El valor de caudal se salda se empleó para definir *QSTART* del fichero.

3.3.7 Fichero de datos para estimaciones, *DATA.INP*

Los datos de entrada de este archivo están en función al tipo de flujo simulado, es decir, que si se decidiera simular flujo dinámico (no estacionario) las entradas serían tiempo vs. concentración de trazador en un mismo punto y un conjunto de datos por tramo modelado. Esta fue la primera intención para realizar la modelización, pero como se explicó en la sección 3.2, la falta de agua o la poca existencia de la misma, limitó la realización de las pruebas de trazador en cada sección, obteniendo solo 2 grupos de datos.

Es así que se decidió simular un flujo estacionario uniforme teniendo como entrada datos interpolados de concentración de trazador *Cl versus* distancia a lo largo del cauce. Estos datos se obtuvieron de la base de datos proporcionada por el proyecto CAMINAR, todo el conjunto de datos son muestreados en una misma fecha, siendo este un factor bastante importante que definió los resultados de simulación de gran manera.

La ubicación de los puntos de muestreo, hechos por CAMINAR, a lo largo del río y fuera del mismo se muestra en la figura 13.

3.3.7.1 Tratamiento geoestadístico

La interpolación de las concentraciones se hizo siguiendo un tratamiento geoestadístico a la base puntos para determinar la mejor técnica de interpolación que se ajusta la tipo de datos con que se trabajo. De estos datos interpolados se realizó un cruce de mapas, es decir, el mapa de distancia generado con el mapa interpolado, obteniendo tablas de valores de distancias *versus* concentraciones para Fe, Pb y Cl del mes de junio del 2007.

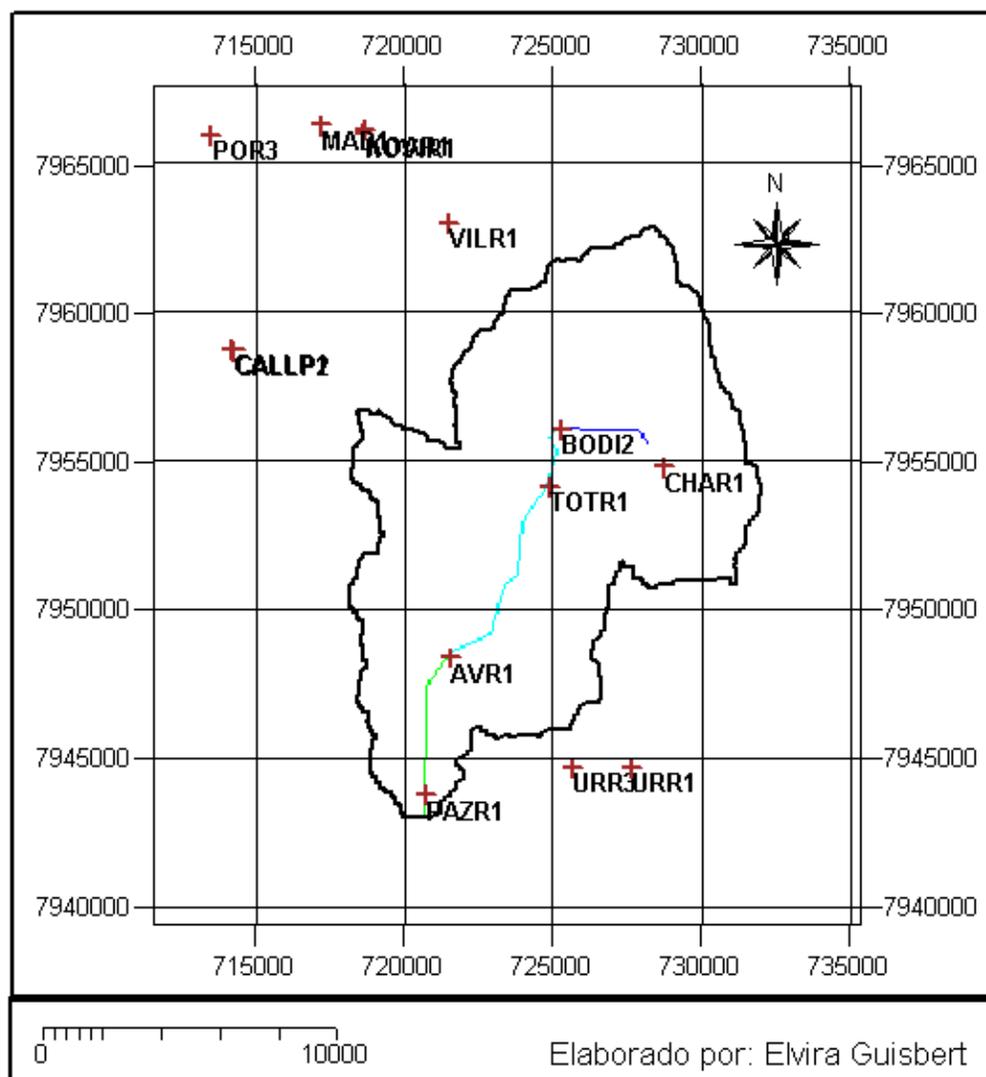


Figura 13: grafica que muestra la ubicación referencial de los puntos muestreados en junio 2007.

Los puntos sobre el río Antequera son 4, la ubicación geográfica, descripción y concentraciones de Fe y Cl y otros parámetros se muestran en la tabla 4.

Observar todo los datos de los puntos mostrados de junio 2007, en la tabla A del anexo I.

Cuadro 2: Datos medidos y cuantificados en junio del 2007, (Fuente, Proyecto CAMINAR).

Fecha	Hr	Código	Punto	Norte	Este	Fe (mg/L)	Pb (mg/L)	pH	C (ms/cm)	Cl (mg/l)
21-jun-07	12h15m	BODI1	salida	725231	7956387	0.1	0.005	8.5	2.67	62.5
24-jun-07	15h00m	TOTR1	Marta	724726	7954198	1.88	0.009	4.7	2.09	35.3
27-jun-07	16h30m	AVR1	Avicaya 2	722154	7948218	3.83	0.005	2.9	2.4	53.5
28-jun-07	18h00m	PAZR1	Pazña Puente	720433	7941834	1.37	0	4.8	1.644	89.7

La ubicación de los puntos sobre el río Antequera coincide con las 4 secciones medidas en campo hechas para este trabajo, noviembre del 2008, por lo que las concentraciones de Fe y Pb se usaron para definir la entrada de *CSBACK*, concentración de base ambiental; y *CLATIN*, concentración lateral del tramo de los ficheros de parámetros y caudal, respectivamente.

En base a todos los puntos de concentraciones observados se procedió a realizar un procesamiento geoestadístico para determinar el mejor tipo de interpolación a usar con este tipo de meta datos.

Una vez realizado este tratamiento de datos y definido el mejor tipo de interpolación a emplear para nuestra distribución espacial de datos, se pudo obtener los valores de concentración de Cl a lo largo del área de la subcuenca y zonas próximas. Con esta información y la obtenida del cálculo de valores de distancia a lo largo del río Antequera, obtenidos del cálculo rutinario de *Distance calculation* de ILWIS. Se hizo un cruce de mapas raster obteniendo su respectiva tabla de donde se obtuvo los datos de distancia y concentración requerido para el fichero DATA.INP (ver datos del fichero DATA.INP en anexo I).

3.3.8 Fichero estadístico, STARPAC.INP

En este fichero estadístico se definieron varios parámetros que controlan el algoritmo STARPAC NLS utilizado por OTIS-P (para mayor información de este algoritmo revisar el manual de OTIS, 1998).

Las condiciones más importantes que deben fijarse son las de STOPP y STOPSS, valor de alto para el parámetro de convergencia y para la convergencia de la suma de cuadrados, respectivamente. Estos dos valores son los que determinan en que momento las iteraciones han convergido a la solución óptima. En este caso se fijaron los valores a 10^{-1} (0.1) es decir que solo se considero variaciones en un decimal para llegar al valor optimo estimado, tanto para el parámetro como para RSS.

A continuación se procedió a seleccionar los parámetros a estimar, es decir, LAMHAT, LAMHAT2, RHO, KD, DISP y ALPHA para el caso de adsorción y para el de decaimiento de primer orden se cambio LAMHAT y LAMHAT2 por LAMBDA y LAMBDA2 y se elimino a RHO y KD, es decir que para el caso de adsorción se estimó en total 6 parámetros y para el caso de decaimiento 4. (ver fichero llenado en anexo I)

3.3.8.1 Estimaciones con OTIS-P para el fenómeno de adsorción.

Para este caso, se empezó con 6 parámetros estimados, tropezando con la dificultad de errores de convergencia, es decir, el sistema era incapaz de realizar estimaciones de este número de parámetros. Siendo así que se vio el modo de reducir el número de parámetros estimados.

Después de revisar los 6 parámetros estimados, para el caso de adsorción, se decidió asumir el valor de RHO (masa de sedimento accesible) como valor conocido, asumiendo que esta cantidad de sedimento es constante, se simule flujo dinámico o estacionario.

Una vez definido este parámetro se procedió a realizar las nuevas estimaciones de los 5 parámetros, LAMHAT, LAMHAT2, KD, DISP y ALPHA.

Con los parámetros estimados se realizó la modelización de las concentraciones de Fe y Pb sobre el canal y zona de almacenamiento simulando un fenómeno de adsorción.

3.3.8.2 Estimación de parámetros con OTIS-P par el fenómeno de decaimiento de primer orden.

Para realizar la simulación de este fenómeno, los ficheros usados fueron los mismos que para adsorción con la salvedad de que dentro del fichero PARAM.INP si habilitó esta opción dando valor de 1 a IDECAY, la cual antes permaneció en 0.

Al habilitar esta opción se debe llenar los campos de LAMBDA y LAMBDA2, los cuales deben ser estimados con OTIS-P del mismo modo en que fueron estimados los parámetros de adsorción.

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Resultados de áreas de sección transversal

Como se observa en el cuadro 3 las secciones A y B no poseen valores de área en las zonas de almacenamiento.

Cuadro 3: Datos de secciones transversales y sus respectivas áreas.

Sección	Descripción	X	Y	AREA TOTAL DE SECCION (m ²)	AREA CANAL PRINCIPAL (m ²)	AREA ZONA ALM (m ²)	Área Mojada (m ²)
A	aguas debajo de comunidad Martha	724217	7953618	22.63	22.63	0	2.21
B	aguas de laguna artificial que llegan a río, Avicaya	721884	7948244	22.30	22.30	0	1.09
C	Puente Pazña. Salida de subcuenca	720408	7941884	79.59	74.89	4.69	3.58
D	aguas arriba de subcuenca Antequera	725257	7955934	81.02	55.48	25.54	0

4.2 Resultados de pruebas de trazador de NaCl

Los resultados mostrados en el cuadro 4 son los descritos en la sección 3.2.1. La estación E1 posee 16 datos de concentración de Cl y 13 datos para la estación E2.

Cuadro 4: Datos de concentraciones de Cl disuelto por estación de trazador en el río Antequera

Estación:	E1		E2	
Tiempo (seg)	mgCl/L	Tiempo (seg)	mgCl/L	
5	140.13	5	158.46	
10	150.77	10	99.33	
15	141.91	15	99.33	
20	145.45	20	106.43	
25	290.91	25	479.82	
30	581.81	30	333.48	
35	361.86	35	171.17	
40	289.13	40	145.45	
45	269.62	45	121.51	
50	174.72	50	111.75	
55	145.45	55	109.98	
60	156.10	60	109.98	
65	153.44	65	109.98	
70	152.55			
75	149.00			
80	149.00			
Cond. Inicial	2.8 mS/cm		2.7 mS/cm	

Graficando estos valores de tiempo vs. Concentración se genero la figura 14, de la cual la curva E1 será la empleada para ingresar las condiciones de borde aguas arribas del río, debido a que es la más cercana a este punto de la subcuenca.

La curva E2 será empleada como datos de entrada del fichero *DATA.INP* simulando un flujo dinámico.

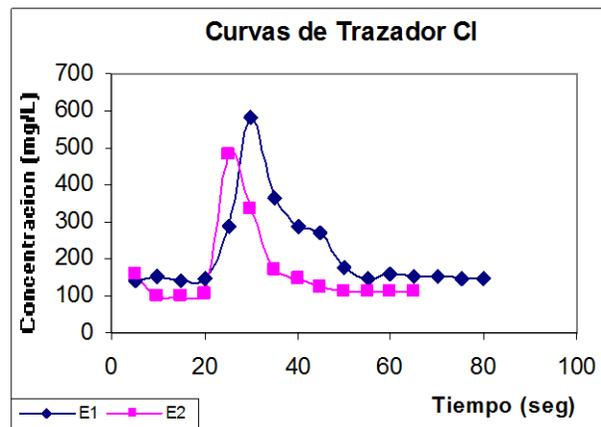


Figura 14: Curva de Trazadores para el río Antequera, E1 se ubica en la sección A y E2 en B.

4.3 Modelización de los límites de la subcuenca Antequera

Como recomienda Parodi, (2004), se intentó realizar una digitalización manual de la subcuenca a partir del mapa de curvas de nivel, pero dicho mapa fue entregado ya

cortado por los límites que maneja el proyecto ASDI/SAREC impidiendo realizar la comparación de los resultados dados por el modelo y los obtenidos manualmente.

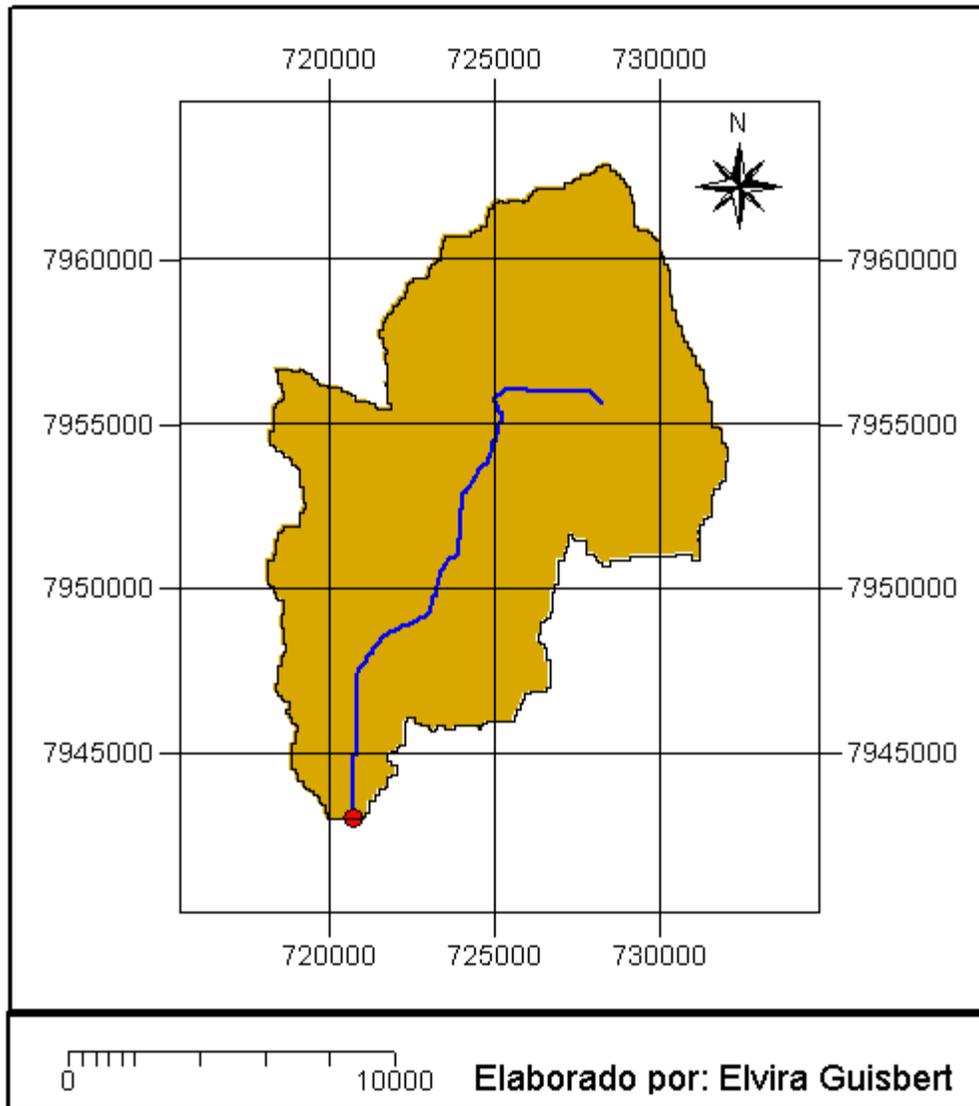


Figura 15: Límites de la subcuenca Antequera obtenido con el modelo GeoHECHMS.

Es por este motivo que se trabajó ya con los límites dados por el modelo. Pese a esto es importante destacar que la información que pueda darnos los límites de la subcuenca es únicamente para la representación visual y no para cálculos con áreas o demás operaciones de SIG.

4.4 Resultados del cálculo de valores de distancia del río Antequera mediante ILWIS

Del mapa obtenido se pudo definir con precisión la ubicación de las secciones transversales, puntos de muestreo, hechos por CAMINAR en junio del 2007, y las

distancias óptimas de cada tramo en función a la ubicación de cada sección y punto de muestreo.

La figura 12 muestra el mapa de distancia generado y la utilización de mismo en la definición de las condiciones mencionadas.

4.5 Resultados de caudales de aforo medidos en campo

El cuadro 5 muestra los resultados del cálculo de caudales de aforo descrito en la sección 3.2.3.

Cuadro 5: Datos calculados para caudal de aforo en cada tramo.

Sección	Descripción	Área Mojada (m ²)	Vel flujo (m/s)	Q (m ³ /s)
A	aguas debajo de comunidad Martha	2.21	0.32	0.71
B	aguas de laguna artificial que llegan a río, Avicaya	1.09	0.45	0.49
C	Puente Pazña. Salida de subcuenca	3.58	0.10	0.36
D	aguas arriba de subcuenca Antequera	0	--	---
Q salida m ³ /s	Valor promedio de 2001 y 2002 dado por SENAMHI.	----	----	0.09

La sección D no presenta valores debido a que no existía agua en su lecho por las razones descritas con anterioridad.

El valor de caudal de salida es el proporcionado por el proyecto ASDI/SAREC-IHH-UMSA.

4.6 Tratamiento geoestadístico a datos observado en junio 2007.

Como se describió en la sección 3.3.7, los datos de entrada para este fichero, simulando un flujo estacionario, deben ser de distancia *versus* concentraciones de Cl, al igual que los datos observados de Fe y Pb. Para ello se realizó el tratamiento geoestadístico descrito, definiendo una distancia limitante 15 000 m obtenida de la figura 16.

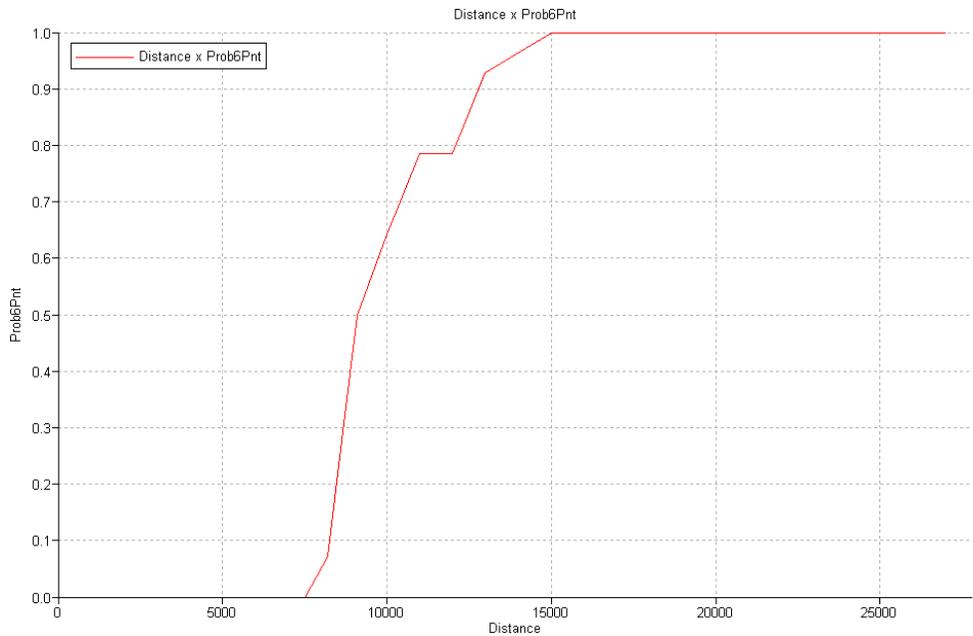


Figura 16: curva que definió el valor 15000 para la distancia limitante usada para las interpolaciones.

Los resultados después del tratamiento geoestadístico se detallan en el cuadro 6.

Cuadro 6: Resultados de correlaciones de tratamiento geoestadístico realizado.

Fe Reales	Fe MAID15	Fe MALD15	Fe MSLD15	Fe MSIDP15
0.169	1.44	24.009	22.465	0
2.336	2.782	21.044	5.305	2.394
0.253	0.618	0.383	0.068	0.256
0.207	0.654	0.437	0.365	0.212
0.269	0.988	13.364	11.431	0.415
2.356	2.903	16.371	3.45	2.313
0.19	0.438	2.959	7.618	0.176
0.228	0.556	2.011	5.423	0.226
3.087	4.523	25.936	16.232	2.993
112	107.906	30.029	27.629	111.721
0.25	2.7	28.753	36.026	0.063
44.725	43.378	29.069	38.624	44.442
41.7	41.427	28.621	42.031	41.703
Correlación*	0.999791	0.524208	0.537179	0.999995

MAID15: Moving Average Inverse Distance, 15000m de dist. limitante
MALD15: Moving Average Lineal Decrease, 15000m de dist. Limitante
MSLD15: Moving Surface Lineal Decrease, 15000m de dist. limitante
MAIDP15: Moving Surface Inverse Distance Planar, 15000m de dist. limitante
*: Coeficiente de correlación de Pearson

De los valores de correlación mostrados se determinó que la mejor interpolación es la de moving surface Inverse Distance con superficie planar, por reproducir con mejor precisión los datos interpolados con los observados.

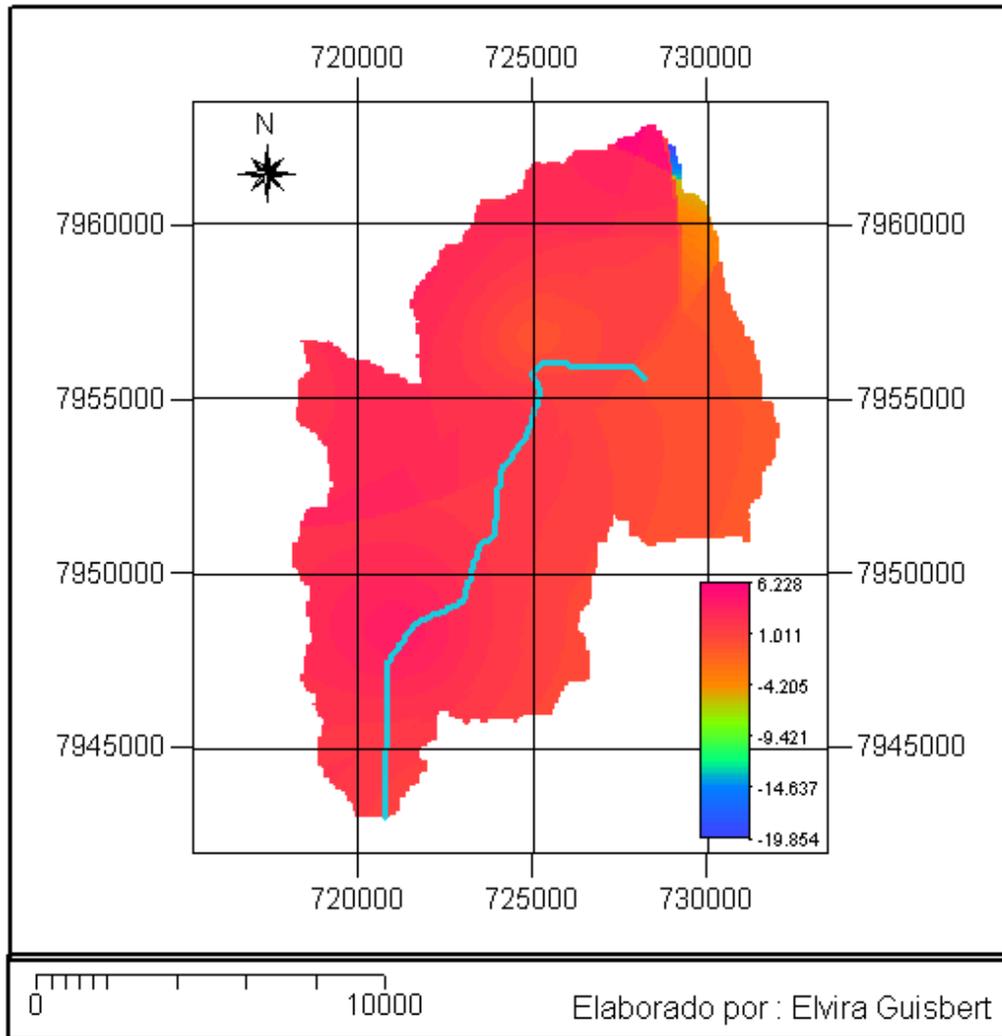


Figura 17: Mapa de interpolación de datos de Fe observados en junio 2007,

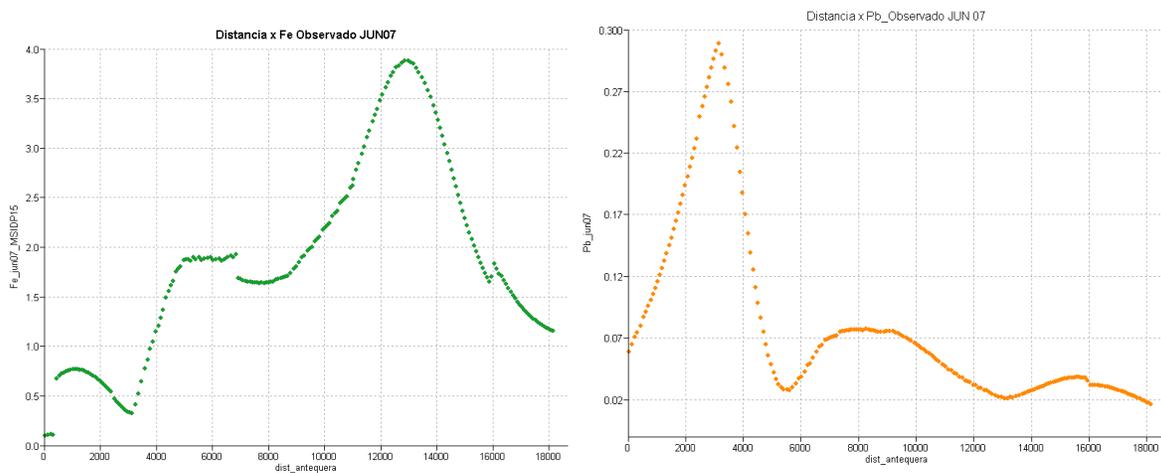


Figura 18: curvas de concentraciones observadas de Fe y Pb a lo largo del cauce.

Las curvas de la figura 18 son el resultado de del cruce de mapas de las concentraciones interpoladas a lo largo del río Antequera.

4.7 Simulación de Fe asumiendo flujo dinámico

De la modelización hecha en flujo dinámico no se obtuvo parámetros estimados en las secciones donde no había datos de trazador. Tampoco se pudo realizar un proceso de interpolación ya que los tramos donde se necesitaba datos (1 y 4) se encontraban aguas arriba y aguas abajo, respectivamente, de las dos secciones que si tenían datos, por lo que se intento realizar la modelización solo con los dos tramos (2 y 3) donde se tenían datos de trazador, pero los resultados de simulación no mostraban ninguna concordancia con los datos observados.

La simulación de transporte con un flujo dinámico se muestra en la figura 19.

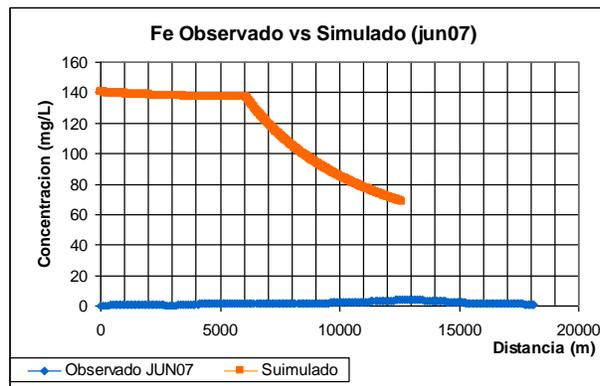


Figura 19: datos observado *versus* simulados de Fe con solo 2 tramos modelados en estado dinámico.

No existe correlación alguna entre los datos observados y simulados de Fe con dos tramos.

El fichero que define una simulación exitosa en flujo dinámico es el de DATA.INP, en el cual deben ingresarse datos de Tiempo versus concentración de trazador, en este caso solo se contaba con dos estaciones de trazador a lo largo de un cauce de 18 Km. de longitud y donde uno de los cuales se empleo para definir las condiciones de borde aguas arriba, disminuyendo aun mas el numero de entradas para el modelo. Siendo así que no se pudo realizar una simulación dinámica.

4.8 Simulación de Fe y Pb asumiendo adsorción en canal principal y zona de almacenamiento del cauce del río Antequera con flujo estacionario

4.8.1 Resultados de estimación de 6 parámetros

Como se describió anteriormente la estimación inicial fue hecha con 6 parámetros.

De dichas estimaciones se observó que el valor de RHO se mantenía constante durante todas las iteraciones realizadas, variando número de tramos, tipos de flujo y número de iteraciones, como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7: valores de RHO repetidos durante serie de iteraciones.

Flujo/Nº tramos	Din/4		Din/2		Est/2		Est/2	
Tramo	1	3	1	2	1	2	1	2
RHO*	40000	20000	40000	20000	40000	20000	40000	20000
Nº Iteraciones	9		7		3		5	

Din : dinámico, Est : Estacionario.

*: Las unidades están dadas en mg/L

En vista a estos resultados se llegó a la conclusión de que esta variable permanecía constante durante las estimaciones, por tanto podía ser considerado como constante y dejar de ser estimado, resolviendo así el problema matemático de tener más incógnitas que variables.

Los valores de RHO para el 1^{er} y 4^{to} tramo simulado bajo flujo estacionario y con 4 tramos fue 40 000, para el 2^{do} y 3^{er} tramo el valor asignado fue de 20 000.

Estos valores se asignaron por la proximidad de los tramos, mostrados en el cuadro 7, con los tramos finales modelados y por lo observado en campo, es decir, que en las cabecera de la cuenca se observó mayor cantidad de sedimento por la actividad minera que existe en esta parte, por otro lado se asignó 40 000 al 4^{to} tramo porque en la parte baja y salida de la cuenca existen zonas de deposición de sedimentos transportados por el fenómeno de inundación en época de lluvia, a diferencia del tramo 2^{do} y 3^{er}, donde las secciones transversales son de menor tamaño (sección A y B) y por tanto la deposición de sedimentos será menor. Sin embargo, si bien el tramo 2^{do} y 3^{er} tienen menor cantidad de sedimentos, esto no quiere decir que sea pequeña esta cantidad, si no por lo contrario, es bastante pero comparada con el tramo 1^{er} y 4^{to} estas son de menor magnitud.

4.8.2 Resultados de estimaciones de 5 parámetros para adsorción de Fe y Pb en 4 tramos.

El cuadro 8 muestra los resultados de las nuevas estimaciones hechas con 5 parámetros para adsorción de Fe.

Los valores de RSS permanecen prácticamente invariables, considerando la magnitud de sus valores, y mucho más los parámetros estimados para cada tramo.

Con los resultados de estas estimaciones se realizó simulación de adsorción para Fe y Pb.

Cuadro8: Resultados de iteraciones para 5 estimaciones en adsorción, 4 tramos y Fe.

TRAMO 1	Sección	D					
parámetros	DISP	ALPHA	KD	LAMHAT	LAMHAT2	RSS	RSD
pasada 1	11030	0.008	7E-05	0.000056	0.0004628	13925	59.0022
pasada 2	0.00012	0.0077	7E-05	0.000056	46284.5	13740.7	58.6104
pasada 3	11983.2	0.0074	7E-05	0.000056	46284.5	13591.9	58.2922
TRAMO 2	Sección	A					
parámetros	DISP	ALPHA	KD	LAMHAT	LAMHAT2	RSS	RSD
pasada 1	0.15	0	7E-05	0.000056	1	41654.5	51.0336
pasada 2	0.15	0	7E-05	0.000056	1	41126.9	50.6994
pasada 3	0.15	0	7E-05	0.000056	1	40950.1	50.3675
TRAMO 3	Sección	B					
parámetros	DISP	ALPHA	KD	LAMHAT	LAMHAT2	RSS	RSD
pasada 1	763107	22348	7E-05	0.000056	156938	26217	93.4826
pasada 2	763110	22348	7E-05	0.000056	156940	26215.5	93.4799
pasada 3	763113	22348	7E-05	0.000056	156942	26214	93.4772
TRAMO 4	Sección	C					
parámetros	DISP	ALPHA	KD	LAMHAT	LAMHAT2	RSS	RSD
pasada 1	8.36456	5E-05	7E-05	0.000056	0.0064881	41437.8	117.527
pasada 2	10.6711	5E-05	7E-05	0.000056	0.0057594	41437.8	117.527
pasada 3	12.9807	5E-05	7E-05	0.000056	0.0051556	41437.7	117.527

Sin embargo, después de observar los resultados mostrado en la tabla 7, se pudo observar que los valores de KD, LAMHAT y LAMHAT2, permanecieron constantes durante las pasadas realizadas, indicando que esto valores no son función directa de DISP ni de ALPHA (ver formulas de ecuaciones mostradas en la sección 2.2.2, por lo que se realizó otra serie de estimaciones de datos pero esta vez asumiendo como reales los valores de RHO, KD, LAMHAT y LAMHAT2. los resultados se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 9: Resultados de iteraciones para 2 estimaciones en adsorción, 4 tramos y Fe.

TRAMO 1	Sección:	D		
parámetros	DISP	ALPHA	RSS	RSD
inicial	11983.2	0.0074	13592	58.29217
pasada1	12478.8	0.0071	13483	43.88748
pasada2	13039.4	0.0069	13412	43.88748
pasada3	13184.2	0.0069	13400	43.75297
pasada4	13337.1	0.0068	13391	43.73285
TRAMO 2	Sección:	A		
parámetros	DISP	ALPHA	RSS	RSD
inicial	0.15	0	40950	50.36745
pasada1	0.15	0	40054	45.91426
pasada2	0.15	0	39509	45.60039
pasada3	0.15	0	39370	45.5203
pasada4	0.15	0	39234	45.44146
TRAMO 3	Sección:	B		
parámetros	DISP	ALPHA	RSS	RSD

inicial	763113	22348	26214	93.47723
pasada1	763114	22348	26212	66.09643
pasada2	763118	22348	26211	66.0944
pasada3	763122	22348	26210	66.09388
pasada4	763126	22348	26210	66.09337
TRAMO 4	Sección:	C		
parámetros	DISP	ALPHA	RSS	RSD
inicial	12.9807	5E-05	41438	117.5269
pasada1	41.3618	4E-05	41437	83.10362
pasada2	70.1745	3E-05	41437	83.10317
pasada3	99.4311	2E-05	41436	83.10272
pasada4	129.144	2E-05	41436	83.10226

Los valores de los cuadros 8 y 9 muestran muy poca variación en los valores de DISP y ALPHA. Esta semejanza se la observa en las graficas de metales simulados para 5 y 2 parámetros estimados, de las más adelante se discutirá con detalle.

El cuadro 10 muestra los resultados obtenidos de las iteraciones hechas para Pb. La única variación para este metal fue los valores de las concentraciones CSBACK y CLATIN en los ficheros de PARAM y Q dados en el cuadro 2.

Cuadro 10: Resultados de iteraciones para 5 y 2 estimaciones en adsorción, 4 tramos y Pb.

TRAMO 1	Sección	D					
parámetros	DISP	ALPHA	KD	LAMHAT	LAMHAT2	RSS	RSD
INICIAL	13337.1	0.0068	7E-05	0.000056	4628		
PASADA1	13922.6	0.0069	7E-05	0.000056	46284.5	13373	57.8207
PASADA2	14466.6	0.0071	7E-05	0.000056	46284.5	13362.5	57.7981
PASADA3	15011.4	0.0074	7E-05	0.000056	46284.5	13352.5	57.7765
INICIAL	15011.4	0.0074	Valores asumidos reales y constantes				
PASADA1	14475.8	0.0008				28655.4	63.8981
PASADA2	13965.9	0.0009				28655.4	63.8981
TRAMO 2	Sección	B					
parámetros	DISP	ALPHA	KD	LAMHAT	LAMHAT2	RSS	RSD
INICIAL	0.15	0	7E-05	0.000056	1		
PASADA1	0.15	0	7E-05	0.000056	1	39388.5	49.6164
PASADA2	0.15	0	7E-05	0.000056	1	39236.2	49.5203
PASADA3	0.15	0	7E-05	0.000056	1	39136.1	49.4571
INICIAL	0.15	0	Valores asumidos reales y constantes				
PASADA1	0.15	0				31920.9	40.9884
PASADA2	0.15	0				31920.9	40.9884
TRAMO 3	Sección	B					
parámetros	DISP	ALPHA	KD	LAMHAT	LAMHAT2	RSS	RSD
INICIAL	763126	22348	7E-05	0.000056	156942		
PASADA1	763123	22348	7E-05	0.000056	156940	29754.8	99.5905
PASADA2	763123	22348	7E-05	0.000056	156938	29752.8	99.5872
PASADA3	763123	22348	7E-05	5.6E-85	156936	29752.5	99.5866
INICIAL	763123	22348	Valores asumidos reales y				

PASADA1	763119	22348	constantes			29747.8	70.4129
PASADA2	763119	22348				29747.8	70.4129
TRAMO 4	Sección	C					
parámetros	DISP	ALPHA	KD	LAMHAT	LAMHAT2	RSS	RSD
INICIAL	129.144	2E-05	7E-05	0.000056	0.0051556		
PASADA1	129.097	2E-05	7E-05	0.000056	0.0043591	45607.7	123.299
PASADA2	763123	158454	7E-05	0.000056	0.0033782	45662.8	123.373
PASADA3	763123	158454	7E-05	0.000056	0.0023984	45662.8	123.373
INICIAL	763123	158454					
PASADA1	763127	158454	Valores asumidos reales y constantes			45723.8	87.2962
PASADA2	763131	158454				45723.8	87.2962

Como se observa en las tablas 8, 9 y 10 los valores de los coeficientes varían ligeramente, a excepción del coeficiente DISP.

Después del tratamiento de datos y obtención de parámetros estimados y cálculos de parámetros de entrada se pudo realizar la modelización de cada metal simulando los dos tipos de fenómenos mencionados con anterioridad.

4.8.3 Adsorción de Fe con 5 parámetros estimados

Los resultados de la estimación de los 5 parámetros detallados en el cuadro 11, se muestran en la figura 20.

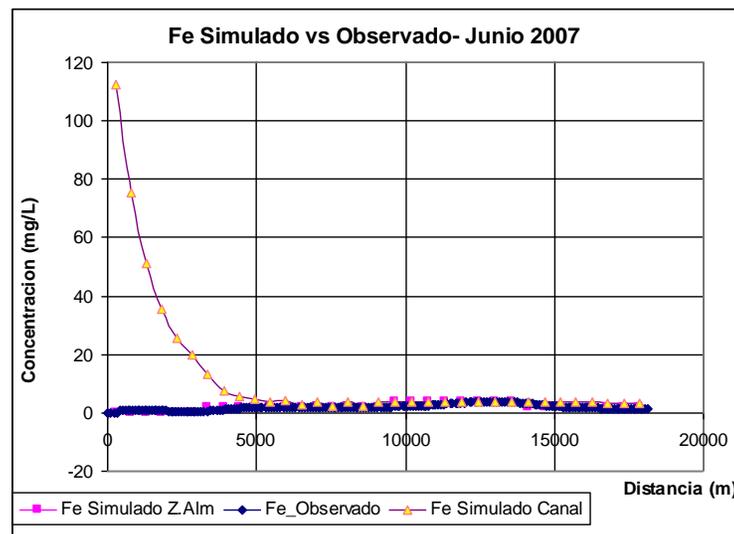


Figura 20: Resultados de simulación de fe comparados con observados en el mes de junio.

En la figura 20 se puede observar claramente que no existe correspondencia con los valores obtenidos en la simulación de Fe, dentro el canal principal del río Antequera, con los datos observados en junio del 2007.

Sin embargo comparando la curva de Fe en la zona de almacenamiento con los observados se puede obtener la figura 21, donde se observa que existe mayor

similitud entre las dos curvas, sugiriendo que las muestras de agua tomadas en junio del 2007, son representativas para zonas de almacenamiento.

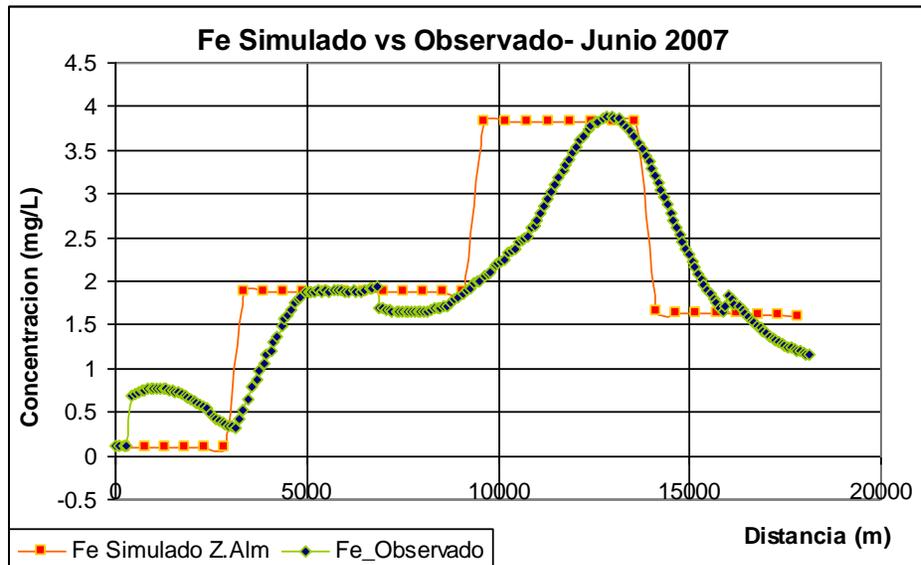


Figura 21: Resultados de simulación de fe comparados con observados en el mes de junio.

Este hecho se puede apoyar recordando que en el mes de junio, dentro la zona de estudio y parte del altiplano Boliviano, el régimen hidrológico se halla en principios de época seca, por tanto no existe gran volumen de agua que fluya por el río Antequera y por ende no existe un transporte de metales de gran significancia, siendo así que los resultados del modelo se ajustan mucho mejor a los fenómenos que ocurren en zonas de almacenamiento.

Otra de las causas por las que la curva simulada no se ajusta tan bien con la observada puede deberse a la falta de secciones transversales medidas en campo y la generación de sus respectivos tramos en el modelo que brinden mayor información sobre las características del río Antequera y los fenómenos de transporte que ocurren en el, haciendo que las curvas observadas y simuladas ajuste mucho mejor.

Como se justificó en la sección 3.2, la falta de agua y por ende lechos de río con secciones transversales definidas o simplemente la existencia de los mismos, puede ser la mayor causa para la baja correlación de datos.

Sin embargo, pese a estos problemas se puede observar una tendencia de comportamiento muy similar en la figura 21, haciéndonos suponer que el resultado simulado no se encuentra tan lejos de la realidad. Siendo así, que se pudo tomar como verdaderos los datos de adsorción simulados dentro la zona de almacenamiento.

De la figura 21 podemos observar que existe cierto tipo de comportamiento, es decir, que la concentración de Fe va subiendo a medida que se avanza por el cauce, con algunos lugares donde no existe incremento notorio hasta llegar a los 1000 a 1400 m

de distancia y 3.83 mg/L, aproximadamente, para luego descender los valores de concentración de Fe hasta la salida de la subcuenca y a un valor de 2 mg/L aproximadamente.

Si se observa nuevamente la figura 13, los valores de distancia se hallan aproximadamente entre Totoral (TOTR1) y Avicaya (AVR1), dos comunidades donde la actividad minera de las empresas pequeñas y actividad de los rescatistas se encuentra en gran magnitud desarrollada, pero sin llevar a cabo ninguna actividad ambiental para el control y mitigación de la contaminación por metales pesados que producen.

Como se dijo en la sección 2.1, es normal encontrar altas concentraciones de Fe en zonas de actividad minera, por la disolución de sales férricas de las rocas existentes en el suelo o dentro de los minerales que contienen los metales explotados, por lo que es lógico suponer que si en las distancia entre los 1000 y 1400 m de longitud existen mayores cantidades de Fe disuelto y transportado, pues es porque existe una mayor extracción de mineral en esta zona. Dicha suposición es verificada en campo, ya que en las cercanías de la comunidad de Avicaya existe la empresa minera Estalsa y aguas abajo de la misma se desarrolla la actividad de los mineros rescatistas sobre las colas de desmontes y lavado continuo de dichas colas con aguas del río Antequera.

A partir de esta distancia se observa una disminución de las concentraciones de Fe sobre la zona de almacenamiento, hasta llegar a la salida de subcuenca.

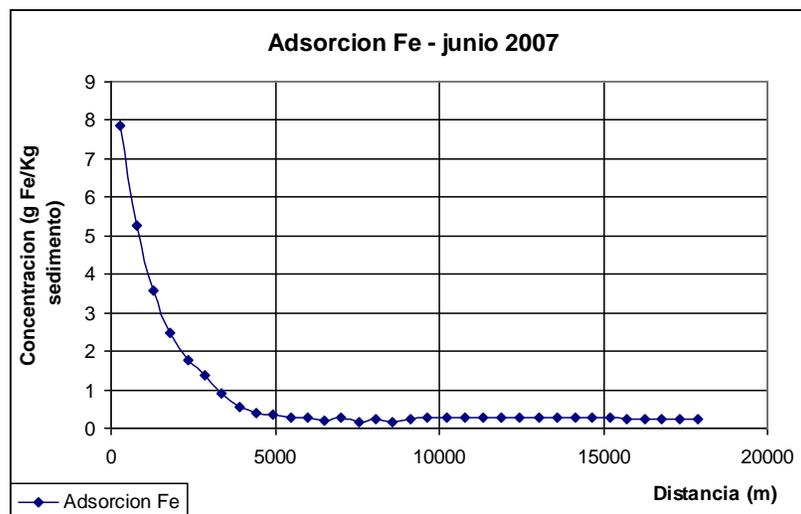


Figura 22: concentraciones de Fe adsorbido a la largo del río Antequera.

La figura 22 muestra las concentraciones de Fe adsorbidas a los sedimentos y a lo largo del cauce Antequera.

El mayor valor de concentración es de 7.8 g Fe/Kg de sedimento tanto en el canal principal como en la zona de almacenamiento y va disminuyendo a medida que las

distancia del río aguas arriba hacia aguas abajo, incrementa. Los valores mas bajos se encuentran alrededor de 0.15 g Fe/Kg de sedimento.

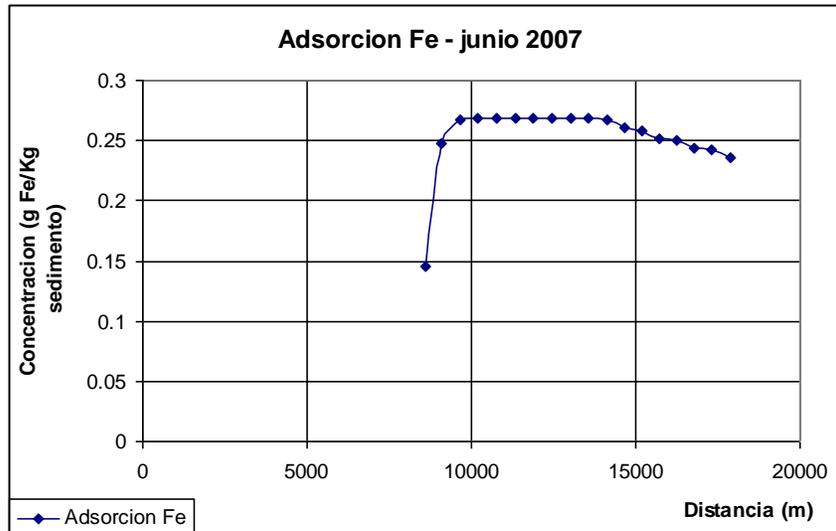


Figura 23: concentraciones de Fe adsorbido a la largo del río Antequera, a partir de los 1000 m

Si se observa con mas detalle lo que sucede entre los 1000 y 1400 m de longitud, podemos observar un comportamiento similar a las concentraciones de Fe disuelto simulado en la zona de almacenamiento, es decir, un ligero incremento (a 0.27 g Fe/Kg sedimento) en estas zonas cercanas a la empresa minera de Estalsa permaneciendo constante hasta los 1400 m aproximadamente, para descender hasta un valor de 0.24 g Fe por Kg de sedimento.

Los resultados de las graficas se presentan en el cuadro 11.

Cuadro 11: concentraciones de Fe disuelto y adsorbido a la largo del río Antequera

Distancia (m)	mgFe/L en Canal	mgFe/L en Z-Alm	gFe/kg sedimento
259.83	112.36	0.10	7.87
779.50	75.51	0.10	5.29
1299.17	51.21	0.10	3.58
1818.83	35.43	0.10	2.48
2338.50	25.53	0.10	1.79
2858.17	19.87	0.10	1.39
3378.46	13.13	1.88	0.92
3899.38	7.67	1.88	0.54
4420.29	5.41	1.88	0.38
4941.21	4.85	1.88	0.34
5462.13	3.71	1.88	0.26
5983.04	4.04	1.88	0.28
6503.96	2.93	1.88	0.21
7024.88	3.71	1.88	0.26
7545.79	2.44	1.88	0.17
8066.71	3.58	1.88	0.25

Distancia (m)	mgFe/L en Canal	mgFe/L en Z-Alm	gFe/kg sedimento
8587.63	2.08	1.88	0.15
9108.54	3.54	1.88	0.25
9649.81	3.82	3.82	0.27
10211.44	3.83	3.83	0.27
10773.06	3.83	3.83	0.27
11334.69	3.83	3.83	0.27
11896.31	3.83	3.83	0.27
12457.94	3.83	3.83	0.27
13019.56	3.83	3.83	0.27
13581.19	3.83	3.83	0.27
14128.81	3.83	1.65	0.27
14662.44	3.72	1.64	0.26
15196.06	3.69	1.64	0.26
15729.69	3.59	1.62	0.25
16263.31	3.57	1.62	0.25
16796.94	3.47	1.61	0.24
17330.56	3.47	1.61	0.24
17864.19	3.37	1.60	0.24

Es importante hacer notar que una simulación de adsorción de cualquier metal es función directa de su coeficiente de adsorción para un tipo determinado de sedimento (KD), por lo que la estimación de este parámetro debería hacerse en laboratorio realizando pruebas del metal objeto de estudio con muestras de sedimentos del área estudiada para poder conocer el valor preciso a las condiciones originales de trabajo.

Este procedimiento no se lo pudo realizar debido al corto tiempo para la realización de este trabajo.

4.8.4 Adsorción de Fe con 2 parámetros

Los resultados obtenidos para esta estimación con solo dos parámetros, DISP y ALPHA, fue muy similar al de 5 parámetros, indicándonos independencia de las variables RHO, KD, LAMHAT y LAMHAT2 sobre las variables DISP y ALPHA en una modelación de adsorción.

Al igual que en la sección 4.7.3, los datos simulados en el canal no presentan correlación con los observados, sin embargo, dentro de la zona de almacenamiento la correlación entre simulados y observados se vuelve a dar y en la misma magnitud de concentración. Como se observa en la figuras 24 y 25.

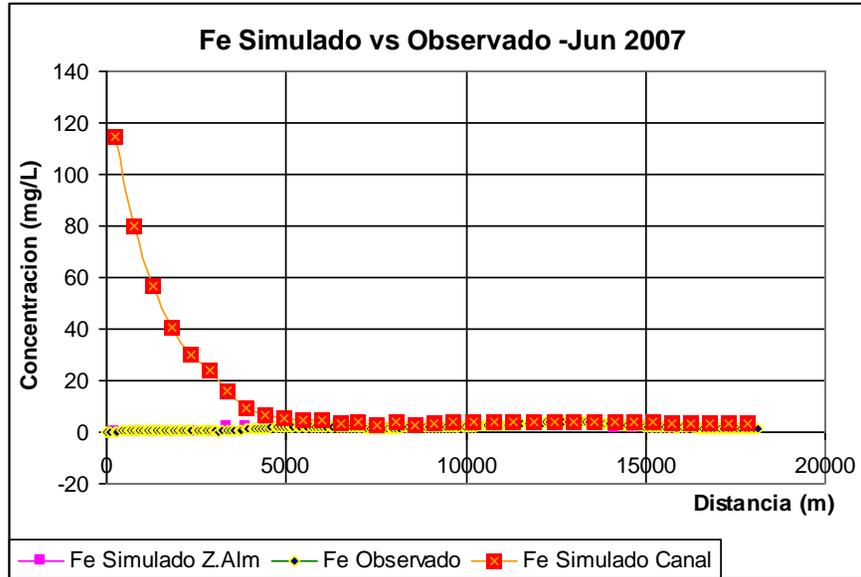


Figura 24: Resultados de simulación de fe comparados con observados en el mes de junio- 2 estimaciones.

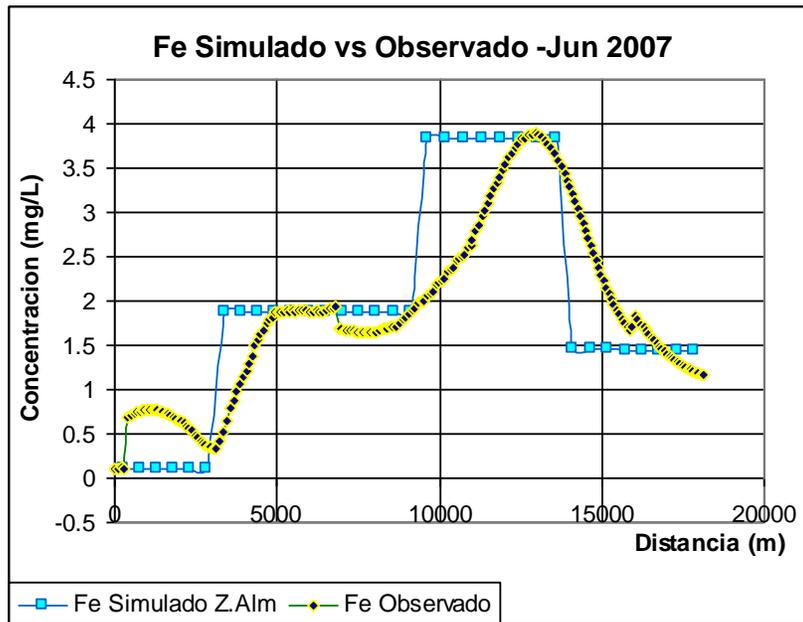


Figura 25: Resultados de simulación de fe comparados con observados en el mes de junio- 2 estimaciones.

Para el caso de adsorción de Fe los fenómenos son los mismos, es decir, mayor concentración de Fe depositado en sedimentos en las cabeceras de la subcuenca Antequera y ligeros incrementos en los tramos 10000 y 14000 m, aproximadamente.

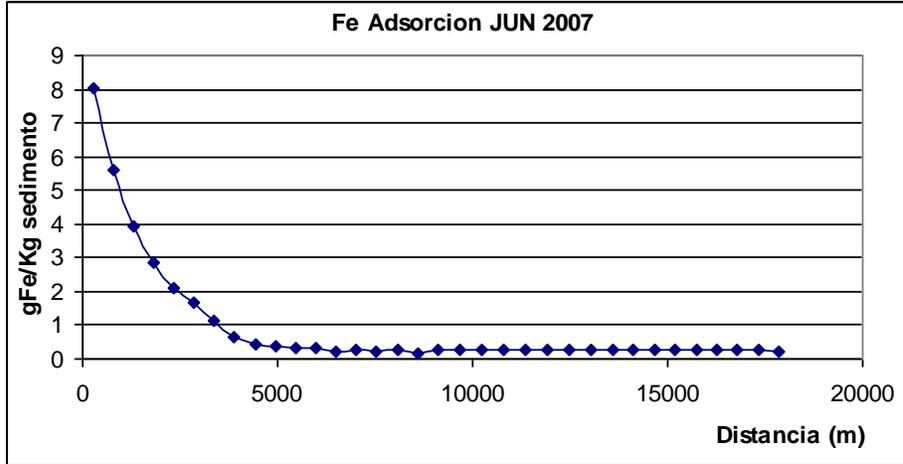


Figura 26: concentraciones de Fe adsorbido a la largo del río Antequera.

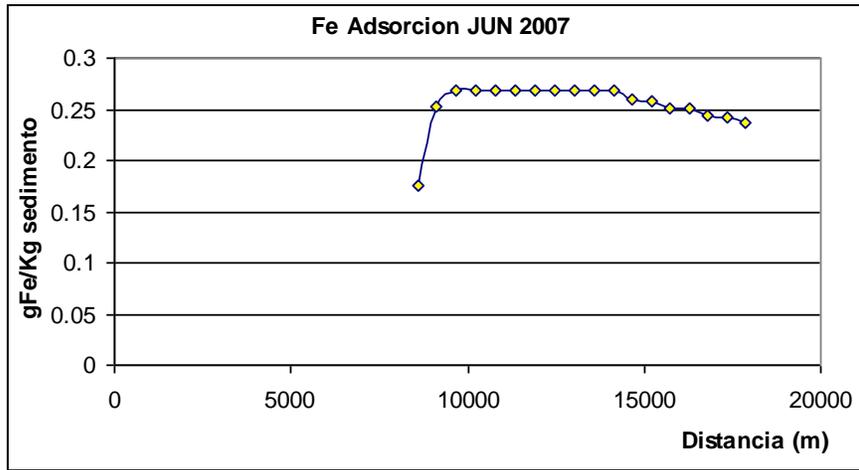


Figura 27: concentraciones de Fe adsorbido a la largo del río Antequera, a partir de los 1000 m

Las concentraciones de FE adsorbidas, presentan el mismo comportamiento descrito con anterioridad, es decir, un ligero incremento en el tramo de 1000 a 1400 m de longitud y en la misma magnitud. Estos valores se detallan en el cuadro12.

cuadro12: concentraciones de Fe disuelto y adsorbido a la largo del río Antequera- 2 estimaciones.

Distancia (m)	mg Fe/L Canal	mg Fe/L Z-Alm	gFe/kg sedimento
259.83	114.81	0.10	8.04
779.50	80.05	0.10	5.60
1299.17	56.38	0.10	3.95
1818.83	40.51	0.10	2.84
2338.50	30.23	0.10	2.12
2858.17	24.13	0.10	1.69
3378.46	16.27	1.88	1.14

Distancia (m)	mg Fe/L Canal	mg Fe/L Z-Alm	gFe/kg sedimento
3899.38	9.23	1.88	0.65
4420.29	6.48	1.88	0.45
4941.21	5.55	1.88	0.39
5462.13	4.38	1.88	0.31
5983.04	4.44	1.88	0.31
6503.96	3.45	1.88	0.24
7024.88	3.96	1.88	0.28
7545.79	2.89	1.88	0.20
8066.71	3.72	1.88	0.26
8587.63	2.51	1.88	0.18
9108.54	3.60	1.88	0.25
9649.81	3.83	3.83	0.27
10211.44	3.83	3.83	0.27
10773.06	3.83	3.83	0.27
11334.69	3.83	3.83	0.27
11896.31	3.83	3.83	0.27
12457.94	3.83	3.83	0.27
13019.56	3.83	3.83	0.27
13581.19	3.83	3.83	0.27
14128.81	3.83	1.46	0.27
14662.44	3.72	1.45	0.26
15196.06	3.69	1.45	0.26
15729.69	3.59	1.45	0.25
16263.31	3.58	1.45	0.25
16796.94	3.48	1.44	0.24
17330.56	3.47	1.44	0.24
17864.19	3.37	1.44	0.24

Los valores de las concentraciones observadas e interpoladas se detallan en anexo I en el fichero DATA.INP

4.8.5 Adsorción de Pb con 5 parámetros estimados

Los resultados obtenidos de la estimación y modelización no tuvieron buena correlación con los datos observados para Pb en el mes de junio 2007, como se puede observar en las figuras 28 y 29.

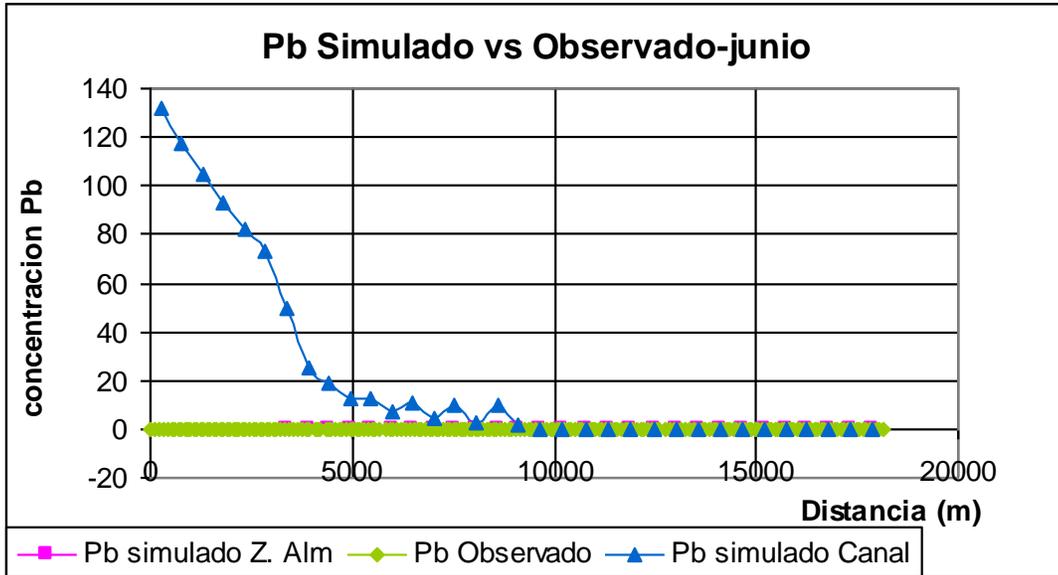


Figura 28: Resultados de simulación de Pb comparados con observados en el mes de junio- 5 estimaciones.

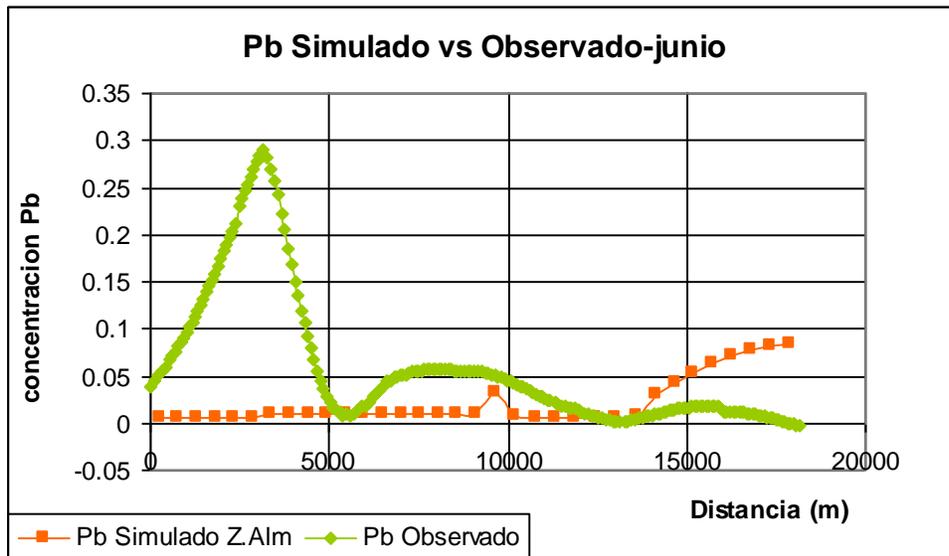


Figura 29: Resultados de simulación de Pb comparados con observados en el mes de junio- 5 estimaciones

Al igual que para Fe se esperó encontrar resultados aceptables considerando solo la zona de almacenamiento, pero como se puede observar en la figura 29, no existe correlación entre los valores observados y simulados.

Por lo tanto no se prosiguió con un análisis de adsorción de Pb ya que los resultados generados no son validos para el mismo año.

Los valores simulados para este metal se detallan en la Cuadro 13.

Cuadro 13: concentraciones de Pb disuelto y adsorbido a la largo del río Antequera- 5 estimaciones

Distancia (m)	mgPb/L en Canal	mgPb/L en Z-Alm
259.833	131.980	0.005
779.500	117.434	0.005
1299.167	104.452	0.005
1818.833	92.861	0.005
2338.500	82.508	0.005
2858.167	73.253	0.005
3378.458	49.741	0.009
3899.375	25.370	0.009
4420.292	18.427	0.009
4941.208	12.134	0.009
5462.125	12.568	0.009
5983.042	7.384	0.009
6503.958	10.566	0.009
7024.875	4.712	0.009
7545.792	9.811	0.009
8066.708	2.845	0.009
8587.625	9.608	0.009
9108.542	1.373	0.009
9649.813	0.032	0.032
10211.440	0.007	0.007
10773.060	0.006	0.006
11334.690	0.006	0.006
11896.310	0.006	0.006
12457.940	0.006	0.006
13019.560	0.006	0.006
13581.190	0.008	0.008
14128.810	0.030	0.030
14662.440	0.042	0.042
15196.060	0.054	0.054
15729.690	0.063	0.063
16263.310	0.071	0.071
16796.940	0.077	0.077
17330.560	0.081	0.081
17864.190	0.083	0.083

La falta de correlación en la modelización puede deberse a los valores bajos de concentraciones iniciales ingresadas al modelo, es decir CSBACK y CLATIN.

Los valores de Pb disuelto analizados mostrados en la tabla 4, se encuentran por el orden de los 0.005 mg/L, pudiendo ser esta la fuente de imprecisión en los valores simulados de Pb, ya que las demás variables permanecieron similares a las empleadas para Fe, como se mostró en los cuadros 9 y 10.

4.8.6 Adsorción de Pb con 2 parámetros estimados

Los resultados obtenidos de la estimación y modelización no tuvieron buena correlación con los datos observados para plomo en el mes de junio 2007, como se puede observar en las figuras 30 y 31.

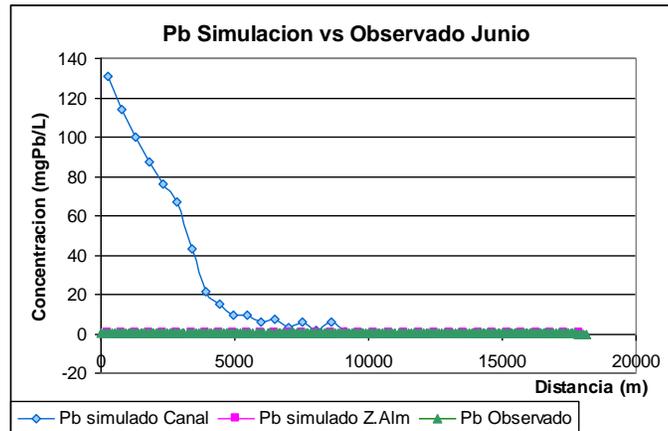


Figura 30: Resultados de simulación de Pb comparados con observados en el mes de junio- 2 estimaciones.

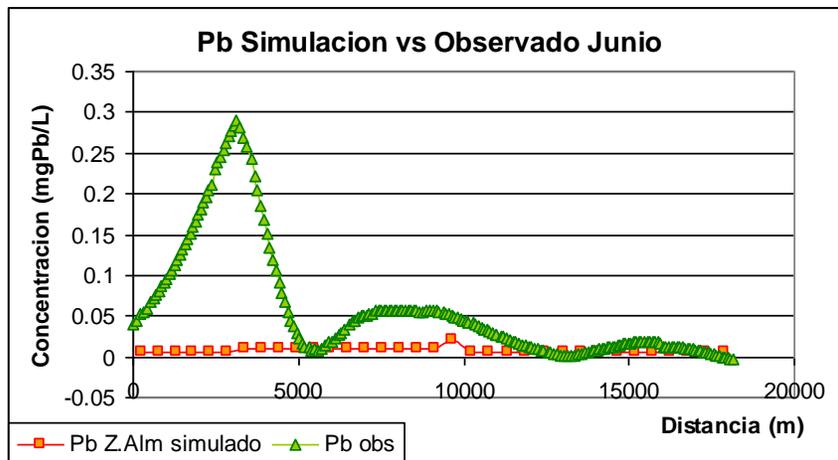


Figura 31: Resultados de simulación de Pb comparados con observados en el mes de junio- 2 estimaciones

Al igual que para el caso de 5 estimaciones, no se obtuvo resultados aceptables para Pb.

Los valores observados son mucho más grandes que los simulados.

4.9 Simulación de Pb asumiendo decaimiento de primer orden en canal principal y zona de almacenamiento del cauce del río Antequera.

En vista que para Pb no existía resultados buenos asumiendo un fenómeno de adsorción, se hizo nuevas iteraciones, pero esta vez, asumiendo que existe reacción

de decaimiento de primer orden preponderante en el medio que gobierna la cinética de formación de nuevos compuesto y desaparición del Pb.

De las iteraciones realizadas y pruebas de convergencia se obtuvieron las graficas mostradas en las figuras 32 y 33.

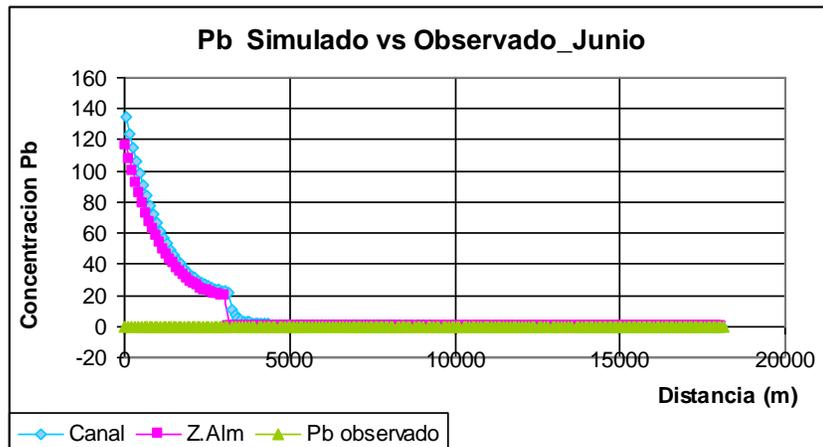


Figura 32: Resultados de simulación de Pb para decaimiento de 1er orden.

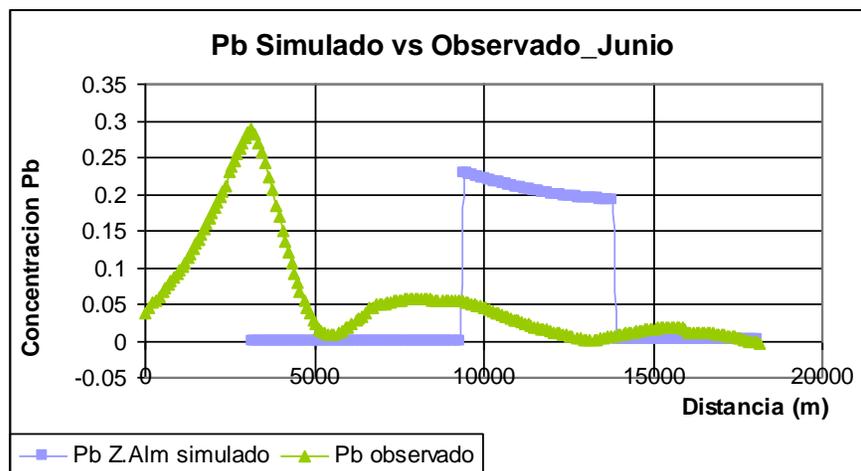


Figura 33: Resultados de simulación de Pb para decaimiento de 1er orden.

Como se observa, nuevamente no existe similitud con las concentraciones observadas de Pb en junio del 2007.

El no poder realizar simulaciones en los dos posibles procesos químicos de transporte de metales, nos indica que existe algún problema en la entrada de datos, es decir, en la estimación o en la entrada de datos.

Se puede descartar el error en la estimación de parámetros con OTIS-P ya que el mismo procedimiento y variables constantes se usaron para el caso de Fe, donde si se obtuvo resultados aceptables comparados con los datos observados.

Así que, por lo tanto el error, para el caso de Pb se halla en la magnitud de las concentraciones de entrada ya mencionados anteriormente, CSBACK y CLATIN, ya que es la única variación que existe entre las simulaciones hechas para Fe con 2 parámetros, DISP y ALPHA, mismos parámetros que fueron estimados para Pb.

5 CONCLUSIONES

- Las pruebas de estimación de parámetros a través de OTIS-P fueron exitosas, para el caso de Fe y simulando un fenómeno de adsorción, obteniendo valores de RSS aceptables según los test de convergencia que realiza la extensión estadística.

Para el caso de Pb las estimaciones, en la etapa de evaluación estadística, parecían ser exitosas, según los criterios de convergencia, pero ya al momento de realizar la modelación los resultados comparados con los observados no presentaron ninguna correlación, indicando que la falla se halla en la magnitud de las concentraciones de entrada del metal.

Por tanto se puede concluir que para valores pequeños de concentraciones, el modelo presenta limitaciones al momento de lanzar resultados verdaderos o al menos por el orden de los 50 µg/L, como es el caso del Pb..

- Para el caso de Fe la simulación demostró que el fenómeno de adsorción es el preponderante en el río Antequera y que para la época seca, mas precisamente, el mes de junio, el proceso de transporte y cambios químicos de los elementos se los puede llegar a considerar mayoritarios en las zonas de almacenamiento, debido a la falta o la inexistencia de agua y secciones transversales destruidas por la actividad minera, alterando la topografía de relieve del río Antequera.
- Las reacciones de decaimiento de primer orden, no pudieron ser constatadas como existentes en el río Antequera, ya que el Fe presentó fenómenos de adsorción y no así decaimiento.
- Para el caso de Fe se pudo determinar que las zonas donde existe mayor deposición en sedimentos son en la parte alta de la subcuenca, cercanías de la mina Sinchi Wayra descendiendo en concentraciones hasta cercanías de la actividad minera de rescatistas y las empresas mineras pequeñas donde un ligero incremento se produce, tramo de 10000 a 14000 m de longitud, con concentraciones de Fe de 0.27 gFe/Kg sedimento.
- El Fe se encuentra transportado a lo largo del río Antequera, teniendo una mayor acumulación de concentraciones disueltas en el tramo de 10000 a 14000 m, para luego disminuir en concentración hasta la salida de la cuenca.

6 RECOMENDACIONES

- 1 Realizar salidas de campo, en época húmeda, para la medición de secciones transversales cada 5 Km para la simulación significativa en el canal principal.
- 2 Realizar mediciones de trazador en cada sección, para modelar un flujo dinámico.
- 3 Para la serie de datos a modelar es importante tener datos de trazador de la misma época o lo mas cercanas posibles.
- 4 Realizar pruebas de laboratorio para estimar valores de coeficientes de distribución de cada metal y en el mismo tipo de sedimento del área de estudio.
- 5 Realizar determinaciones de RHO, masa de sedimento accesible por unidad de volumen, en laboratorio.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Anónimo, “sobre la modelización sin limites del transporte de contaminante”, Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente, Valencia, AIH-GE, 1998 [en línea] Disponible en: http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdf/lib3/padilla.pdf
- Anónimo, “ecuación de convección difusión unidimensional” [en línea] [Fecha de consulta: 20 de octubre 2008] Disponible en: <http://www.imac.unavarra.es/Cursos/AyMFC/pascau/notes/CSF2parte.pdf>
- Anónimo; “ANEXO II, conceptos generales sobre dispersión” [en línea] [Fecha de Consulta: 21 de octubre 2008]. Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro41/pdf/lib41/in_2a.pdf
- APHA, AWWA, WPCF, 1992; “Métodos Normalizados” para el análisis de aguas potables y residuales. Ed. Díaz Santos, SA.
- Avery H, Francisco, “cinética química básica y mecanismo de reacción”, pag 14, determinación de K” [en línea] Disponible en: http://books.google.com.bo/books?hl=es&lr=&id=PG1u2E-9Nd4C&oi=fnd&pg=PR5&dq=reacciones+primer+orden&ots=YfU05X8ZUr&sig=z8n7kOMQJt0YNY7TGJxmmQkJ_NA#PPA14,M1
- ASDI/SAREC-UMSA. 2000-2003. Informe final Primera Fase 2000-2003 del Proyecto “Manejo de Recursos hídricos-hidroquímica de la cuenca de los lagos Poopó y Uru Uru. (2004); La Paz, Bolivia, 2007.
- Bocangel, Danilo.. Bolivia: Estudio Regional/Nacional sobre la Pequeña Minería y Artesanal; 2001,
- Broshears, R.E., Bencala, K.E., Kimball, B.A., and McKnight, D.M., 1993, Tracer-dilution experiments and solute-transport simulations for a mountain stream, Saint Kevin Gulch, Colorado: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4081, 18 p.

- Buscaglia G., Dari E; Zamonsky O. "efectos de los coeficientes de dispersión sobre la modelación bidimensional de Transporte de continuo" *Mecánica computacional* Vol. XXII, 2004, [en línea]
Disponible en: http://www.cab.cnea.gov.ar/enief/dirjobs/S01/JCardini_final.pdf
- Calizaya Andrés *et. al.* 2006. Hidrología y Recursos Hídricos en la Cuenca de los Lagos Poopò y Uru Uru; (Instituto de Hidráulica e Hidrología, IHH) en: Memoria del Seminario Taller: "Intercambio de Experiencias en la región de los lagos Poopò y Uru Uru y sus Áreas de Influencia" UMSA –ASDI/SAREC; Oruro, Bolivia.
- CAMINAR, Quintanilla J y Lorini, Catchment's Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America, 2008
- Camacho y Bitar, "Implementación de un modelo de transporte de metales pesados en el río Magdalena tramo Girardot-Honda, Universidad de los andes, Bogota, Colombia" [en línea] [Fecha de consulta: 25 de octubre 2008]
Disponible:
http://triton.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/1992/757/1/MI_ICYA_2005_036.pdf
- CDC, 1991. preventing lead poisoning in your children. A statement by the Centre of Disease Control US. Department of Health and Human servies, Atlanta, GA.
- Dennis, J.E., Jr., Gay, D.M., and Welsh, R.E., 1981, An adaptive nonlinear least-squares algorithm: Association for Computing Machinery, Transactions on Mathematical Software, v. 7, no. 3, p. 348-368.
- Domy, C.A., 19686, Trace elements in terrestrial environment biogeochemistry and distribution of metals, 1th edition, pag 379 -403.
- GEMS/AGUA, guía operativa, Sistema global de monitoreo ambiental, 3^{ra} edicion, 1992, paginas 6-10, 14.
- Echarri, Luis; 1998; "metales tóxicos, Ciencias de la tierra y del medio ambiente, metales tóxicos, libro electrónico [en línea] [fecha de consulta: 19 de noviembre 2008]
Disponible en:
<http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/09ProdQui/120MetTox.htm>
- Havey E.Jobson, "predicción del tiempo de viaje y dispersión longitudinal en ríos y riachuelos" [en línea]
Disponible en: <http://water.usgs.gov/osw/pubs/disp/dispersion.pdf>
- Molerio L.F. león, CESIGMA S.A., marzo 2007, "Procesos de transporte de masas en la cuenca santa Ana, Cuba, Modelación matemática" [en línea]
Disponible en:
http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1382#0
- M. Luis, "esquema explícito en la solución de la ecuación de dispersión", Instituto mexicano de la tecnología del agua, CNA, [en línea]
Disponible en: <http://www.science.uwaterloo.ca/~lfleonvi/artics/art07.pdf>
- MMSD Proyecto. International Institute for Environment and Development (IIED)- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) MEDMIN Foundation. La Paz, Bolivia, 2001.
- NB 512, 1992; Norma Boliviana 512, de La ley 1333, IBNORCA.
- Parodi G, 2008, "Integración entre SIG y modelamiento Hidrológico, estudio de caso Teba utilizando HEC Geo HMS", ITC-WRES, Holanda.

- Peñaranda J., Indicadores de contaminación IEC, instituto de Investigaciones socioeconómicas, 1996, [en línea]
Disponible en: <http://www.iisec.ucb.edu.bo/papers/1991-2000/iisec-dt-1996-02.pdf>
- OTIS manual, 1998
<http://co.water.usgs.gov/otis/documentation/primary/wrir98-4018.pdf>
- Manual QUAL2K, junio 28 2007; Steve Chapra, Greg Pelletier and Hua Tao, "A modelling Framework for Simulating River and Stream water Quality"; version 2.07.
- Pascuzzo C. Lima, Mecanismo acción Toxica. [En línea] [Fecha de consulta: 17 de noviembre 2008].
Disponible en: http://www.geocities.com/carminepascuzzolima/Tox_Antd.pdf.
- Runkel, "Analysis transient storage subject to unsteady flow", Journal of North American Benthological Society, v 17, no 2, p 145-154, [en línea]
Disponible en: <http://co.water.usgs.gov/otis/documentation/jnabs98/jnabs98.pdf>
- Runkel, R.L., and Broshears, R.E., 1991, One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS), Absolute transport model for small streams: Boulder, Colo., University of Colorado, CADSWES Technical Report 91-01, 85 p.
- Salina A.R., 2005, tesis de grado, "Estudio geomorfológico del área de Antequera y Tacagua, departamento de Oruro", UMSA-IHH-ASDI SAREC.
- Viessman Warren, Jr y Lewis Gary, 1996; "Introduction to Hydrology, 4th edition, University of Florida and Consulting engineer, editorial de Haper Collins Collage Publishers.

8 ANEXOS

8.1 Anexo I

Fichero de control CONTROL.INP

```
CONTROL.INP - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#####
#
#           OTIS control file
#
#
# line           name of the:
# ----          -
# 1              parameter file
# 2              flow file
# 3 to 2+NSOLUTE solute output files
# 3+NSOLUTE to 2+(NSOLUTE*2) sorption output files (ISORB=1 only)
#
#####
params.inp
q.inp
FE4.out
sor4.out
0
```

Fichero de Parámetros, PARAM.INP

```
PARAMS.INP - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#####
#
#           OTIS parameter file
#
# 2007, Hierro en aguas superficiales-Antequera
#
# Parameter values from:
#
# proyecto CAMINAR- junio 2007 y noviembre 2008
#
#####
Río Antequera,Oruro - 2007 junio
2 | PRTOPT
0.0 | PSTEP [hour]
0.0 | TSTEP [hour]
0.00 | TSTART [hour]
0.00 | TFINAL [hour]
0.0 | XSTART [L]
0.0 | DSBOUND [(L/sec)CU]
4 | NREACH
#####
#
# Physical Parameters for each reach
#
#NSEG RCHLEN DISP AREA2 ALPHA
# | | | |
#####
6 3118.0 1.19832E+04 25.54 7.39116E-03
12 6251.0 1.50E-01 0.01 0.0E+00
8 4493.0 7.63110E+05 0.01 2.23479E+04
8 4269.0 1.29807E+01 4.69 4.66792E-05
#####
#
# Number of solutes and flags for decay and sorption
#
# NSOLUTE (col.1-5) IDECAY(col.6-10) ISORB(col.11-15)
#
# | |
#####
1 0 1
#####
```

```

#####
#
# Decay Coefficients (IDECAY=1, only)
#
#           for I = 1, NREACH
#
#LAMBDA      LAMBDA2
#           |
#####
#####
#
# Sorption Parameters (ISORB=1, only)
#
#           for I = 1, NREACH
#
#LAMHAT      LAMHAT2      RHO      KD      CSBACK
#           |           |           |           |
#####
5.6E-05      4.62845E+04  4.0E+04      7.0E-05      0.10
5.6E-05      1.0E+00      2.0E+04      7.0E-05      1.88
5.6E-05      1.56940E+05  2.0E+04      7.0E-05      3.83
5.6E-05      5.15556E-03  4.0E+04      7.0E-05      1.34
#####
# Print Information
#####
14      0      NPRINT (col.1-5) IOPT (col.6-10)
3118.0      (PRTLOC for I = 1, NPRINT)
4000.0
5000.0
6027.0
7000.0
8000.0
9000.0
10000.0
11000.0
12534.0
13000.0
14000.0
15000.0
16044.0
#####
#
# Boundary Conditions
#
#####
16      3      NBOUND (col.1-5) IBOUND (col.6-10)
#####
#           for I = 1, NBOUND
#
#USTIME      USBC (for i=1, NSOLUTE)
#           |           |           |
#####
18.083      140.1318037
18.167      150.7747255
18.250      141.905624
18.333      145.4532646
18.417      290.9065291
18.500      581.8130583
18.583      361.8593411
18.667      289.1327088
18.750      269.6206855
18.833      174.7212995
18.917      145.4532646
19.000      156.0961864
19.083      153.4354559
19.167      152.5485458
19.250      149.0009052
19.333      149.0009052
#####
0

```

Fichero de salida de Simulación de Fe

Fichero de salida de Adsorción de Fe

FE4.out - Bloc de notas			
Archivo	Edición	Formato	Ver Ayuda
Distancia (m)	Canal	Z-Alm	
259.8333	112.358	0.1000389	
779.5	75.50567	0.1000262	
1299.167	51.21128	0.1000177	
1818.833	35.42895	0.1000123	
2338.5	25.53035	0.1000088	
2858.167	19.86707	0.1000069	
3378.458	13.13375	1.88	
3899.375	7.673836	1.88	
4420.292	5.409961	1.88	
4941.208	4.850166	1.88	
5462.125	3.712835	1.88	
5983.042	4.035628	1.88	
6503.958	2.928996	1.88	
7024.875	3.712883	1.88	
7545.792	2.440233	1.88	
8066.708	3.581077	1.88	
8587.625	2.082111	1.88	
9108.542	3.54259	1.88	
9649.813	3.824517	3.824534	
10211.44	3.829809	3.829809	
10773.06	3.829993	3.829993	
11334.69	3.83	3.83	
11896.31	3.83	3.83	
12457.94	3.83	3.83	
13019.56	3.829997	3.829997	
13581.19	3.829896	3.829896	
14142.81	3.826746	1.654112	
14662.44	3.717995	1.640376	
15196.06	3.693794	1.637319	
15729.69	3.589863	1.624151	
16263.31	3.57462	1.622865	
16796.94	3.474442	1.609611	
17330.56	3.467208	1.608697	
17864.19	3.369917	1.596408	

sor4.out - Bloc de notas		
Archivo	Edición	Formato Ver Ayuda
Distancia (m)	Sorción Fe	
259.8333	0.007865061	
779.5	0.005285397	
1299.167	0.00358479	
1818.833	0.002480026	
2338.5	0.001787124	
2858.167	0.001390695	
3378.458	0.000919362	
3899.375	0.000537169	
4420.292	0.000378697	
4941.208	0.000339512	
5462.125	0.000259899	
5983.042	0.000282494	
6503.958	0.00020503	
7024.875	0.000259902	
7545.792	0.000170816	
8066.708	0.000250675	
8587.625	0.000145748	
9108.542	0.000247981	
9649.813	0.000267716	
10211.44	0.000268087	

Fichero de salida de estimación final de parámetros.

params3.out - Bloc de notas					
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	
Parameter Estimation, Reach # 1					
Dispersion Coeff.	Storage Rate	Distrib. Coeff.	M. Channel Sorp. Rate	S. Zone Sorp. Rate	
1.15011E+04	7.68251E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
1.15011E+04	7.68251E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
1.15011E+04	7.68251E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
1.15011E+04	7.68251E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
1.15011E+04	7.68251E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
1.15013E+04	7.68251E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
1.15009E+04	7.68251E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
1.15011E+04	7.68251E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
Estimated Parameters, Reach # 1					
Dispersion Coeff.	Storage Rate	Distrib. Coeff.	M. Channel Sorp. Rate	S. Zone Sorp. Rate	
1.19832E+04	7.39116E-03	7.00000E-05	5.60000E-05	4.62845E+04	
Parameter Estimation, Reach # 2					
Dispersion Coeff.	Storage Rate	Distrib. Coeff.	M. Channel Sorp. Rate	S. Zone Sorp. Rate	
1.50000E-01	0.00000E+00	7.00000E-05	5.60000E-05	1.00000E+00	
1.50000E-01	0.00000E+00	7.00000E-05	5.60000E-05	1.00000E+00	
1.50000E-01	0.00000E+00	7.00000E-05	5.60000E-05	1.00000E+00	
1.50000E-01	0.00000E+00	7.00000E-05	5.60000E-05	1.00000E+00	
1.50000E-01	0.00000E+00	7.00000E-05	5.60000E-05	1.00000E+00	
1.50000E-01	0.00000E+00	7.00000E-05	5.60000E-05	1.00000E+00	
Estimated Parameters, Reach # 2					
Dispersion Coeff.	Storage Rate	Distrib. Coeff.	M. Channel Sorp. Rate	S. Zone Sorp. Rate	
1.50000E-01	0.00000E+00	7.00000E-05	5.60000E-05	1.00000E+00	
Parameter Estimation, Reach # 3					
Dispersion Coeff.	Storage Rate	Distrib. Coeff.	M. Channel Sorp. Rate	S. Zone Sorp. Rate	
7.63110E+05	2.23479E+04	7.00000E-05	5.60000E-05	1.56940E+05	
7.63110E+05	2.23479E+04	7.00000E-05	5.60000E-05	1.56940E+05	
7.63110E+05	2.23479E+04	7.00000E-05	5.60000E-05	1.56940E+05	
7.63110E+05	2.23479E+04	7.00000E-05	5.60000E-05	1.56940E+05	
7.63110E+05	2.23479E+04	7.00000E-05	5.60000E-05	1.56940E+05	
7.63110E+05	2.23479E+04	7.00000E-05	5.60000E-05	1.56940E+05	
1.29807E+01	4.66792E-05	7.00000E-05	5.60000E-05	5.15556E-03	
1.34448E+01	4.66792E-05	7.00000E-05	5.60000E-05	5.15556E-03	
1.29807E+01	4.66792E-05	7.00000E-05	5.60000E-05	5.15556E-03	
1.29807E+01	4.66792E-05	7.00000E-05	5.60000E-05	5.15556E-03	
1.29807E+01	4.66792E-05	7.00000E-05	5.60000E-05	5.15556E-03	
1.29807E+01	4.66792E-05	7.00000E-05	5.60000E-05	5.15556E-03	
Estimated Parameters, Reach # 4					
Dispersion Coeff.	Storage Rate	Distrib. Coeff.	M. Channel Sorp. Rate	S. Zone Sorp. Rate	
1.29807E+01	4.66792E-05	7.00000E-05	5.60000E-05	5.15556E-03	

Fichero de caudal de entrada Q.INP

```

Q.INP - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#####
#
# OTIS steady flow file
#
# 1992 Clackamas River Rhodamine Dump (Laenen & Risley, 1997)
#
#####
0.00 QSTEP [hour]
0.09 QSTART [L^3/second]
#####
# For I = 1, NREACH
#
#QLATIN QLATOUT AREA (CLATIN J=1, NSOLUTE)
#
#####
0.00 0.00 55.48 0.10
0.71 0.00 22.63 1.88
0.49 0.00 22.30 3.83
0.36 0.00 74.89 1.34
    
```

Fichero de entrada DAT.INP

```

DATA.INP - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#####
#
# OTIS-P data file
#
#
# line for J = 1, NREACH
#
# ---
# 1 N - Number of observations for reach J.
# 2-N+1 TIME (time-variable) or DIST (steady-state) associated
# with each observation (col. 1-15) and CONC (col. 16-30)
#
#
# DATOS DE CLORUROS JUNIO 2007
#
#####
#
# Reach 1 0-3118m
#
# 9
# 52.0 6.757
1727.0 43.723
1967.0 42.673
2047.0 42.324
2558.0 41.030
2718.0 41.207
2878.0 41.918
3038.0 43.273
3118.0 44.227
#
# Reach 2 3118-9369m
#
# 21
# 3118.0 44.227
3454.0 51.087
3949.0 51.262
4141.0 48.536
4333.0 48.533
4573.0 44.102
4845.0 40.623
5196.0 35.691
5308.0 36.654
5500.0 36.852
5692.0 37.993
5804.0 40.382
6108.0 45.840
6220.0 49.011
6411.0 52.495
7067.0 52.470
7339.0 54.405
8058.0 58.051
8570.0 60.217
#####
#
# Reach 3 9369-13862m
#
# 8
# 9369.0 61.578
9641.0 61.699
9801.0 61.856
9993.0 61.708
10073.0 61.771
10424.0 61.632
11768.0 55.853
13862.0 62.045
#
#
# Reach 4 13862-16532m
#
# 8
# 13862.0 62.045
14342.0 67.739
14901.0 74.419
15221.0 77.770
15781.0 82.532
16020.0 77.033
16292.0 79.210
16532.0 81.763
#
    
```

Fichero STARPAC llenado

```

STAR.INP - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#####
#
#                               STARPAC Parameter Input File
#                               Rob Runkel 3/11/95
#
#####
#
# Record Types 1-4, Integer values in Columns 1-5
# -----
# IWEIGHT weight Revision option
# IVAPRX  Variance/Covariance Option
# MIT     Maximum Number of Iterations
# NPRT   STARPAC Print option
#
# 0
# 1
# 100
# 22222
#
# Record Types 5-7, Double precision values in Columns 1-13
# -----
# DELTA   Maximum Scaled Change, First Iteration
# STOPP  Stopping Value for Parameter Convergence
# STOPSS Stopping Value for Sum of Square Convergence
#
# 1.0
# 1.D-1
# 1.D-1
#
# For each of the ten model parameters, enter IFIXED (Integer, Col. 1-5)
# and SCALE (Floating Point, Col 6-18).
#
#IFXD SCALE
# | | IFIXED and SCALE for:
# -----
# 0 0.000 Dispersion Coefficient, DISP
# 1 0.000 Main Channel Cross-Sectional Area, AREA
# 1 0.000 Storage Zone Cross-Sectional Area, AREA2
# 0 0.000 Storage Zone Exchange Coefficient, ALPHA
# 1 0.000 Main Channel First-Order Decay Coefficient, LAMBDA
# 1 0.000 Storage Zone First-Order Decay Coefficient, LAMBDA
# 1 0.000 Mass of Accessible Sediment/Volume water, RHO
# 0 0.000 Distribution Coefficient, KD
# 0 0.000 Main Channel Sorption Rate Coefficient, LAMHAT
# 0 0.000 Storage Zone Sorption Rate Coefficient, LAMHAT2

```

Tabla de datos generados por proyecto CAMINAR en junio 2007

CODIGO	X	Y	LUGAR	Pb (mg/L)	Fe (mg/L)	Cl (mg/l)
BODI_1	725231	7956387	salida	0	0	62.4961875
CHAR1	728724	7954791	rió chapana	0.005016	0	5.7679
TOTR1	724726	7954198	Marta	0.009384	1.881	35.2635625
AVR1	722154	7948218	Avicaya-Rio	0	3.829	53.47135
URR3	725637	7944716	Urmiri	0	0	6.5283
URR1	727623	7944730	Urmiri 2	0	0	274.598125
VILR1	721487	7962961	Puente Vilaque	0.336	0	4.7845
KOAR1	718672	7966090	Koa	0.32	0	23.0133
KOVIR1	718646	7965977	Confluencia Koa Vilaque	0.327	0	22.2663
POR3	713501	7965924	Puente Poopo	0.307	0.333	2903.64115
CALLP1	714178	7958740	Callipampa 1	0.3	0	99.8241755
CALLP2	714280	7958687	Callipampa 2	0.282	0	203.47693