

MODELO ESPACIO TEMPORAL HIDROQUÍMICO DE METALES PESADOS DENTRO DE LA CUENCA ANTEQUERA EN BASE A LA ACTIVIDAD MINERA Y AGRÍCOLA

Israel Quino;^a Jorge Quintanilla;^a Javier S. Dalence^b

^a Laboratorio de Hidroquímica, Proyecto CAMINAR, Instituto de Investigaciones Químicas UMSA, Campus Universitario, Edificio FCPN 2° piso, Calle 27 y Calle Andrés Bello, Cota-Cota, La Paz – Bolivia

^b Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales, UMSS, Cochabamba – Bolivia

Keywords: Hidroquímica, cuenca hidrográfica, geoestadística, clasificación digital de imágenes

ABSTRACT

The origin, movement and interaction of heavy metals into water bodies Antequera basin, located near Lake Poopó - Oruro is very important, because mining and agricultural activity that develops in the area. Thus, considering the hydrochemistry of the area (mining and agriculture), we determined that there is great influence of mining on water resources in the basin. Hydrochemical analysis was developed considering the following parameters: arsenic, lead, iron, manganese, copper, cadmium, zinc, calcium, magnesium, sodium, potassium, carbonates, bicarbonates, sulfates, nitrates, pH, and electrical conductivity. These parameters were spatialized directly in the case of surface water and used the Inverse Distance interpolation Moving Average for the case of groundwater. A comparison was made temporary space of parameters with data from the periods: transition, dry and wet from 2007 to 2009. The main metal from mining activities and mining waste is zinc. The characterization of the waters indicates that waters from the mining area are mainly calcium sulfate, whereas the agricultural area has water sodium chloride and calcium bicarbonate. Through the hydrochemistry and supervised classification of satellite images of the basin, we found the relationship between land use and water chemistry. The areas most impacted by the mining activity are: Martha, Avicaya Totoral and along the main channel of river Avicaya and these areas the most affected by this activity is the south of the basin, the town of Pazña, this area forms the infiltration or flood plain, its main activity (agriculture) is greatly affected by mining activities developed in the upper basin.

Corresponding author: israelquino@hotmail.com

RESUMEN

El origen, movimiento e interacción de metales pesados dentro los cuerpos de agua de la cuenca Antequera, localizada en las proximidades al Lago Poopó - Oruro tiene mucha importancia, debido a la actividad minera y agrícola que se desarrolla en la zona. Es así que considerando la hidroquímica de la zona (minera y agrícola), se determinó que existe gran influencia de la actividad minera sobre el recurso hídrico de esta cuenca. El análisis hidroquímico se desarrolló considerando los siguientes parámetros fisicoquímicos: arsénico, plomo, hierro, manganeso, cobre, cadmio, zinc, calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, nitratos, pH, y conductividad eléctrica. Estos parámetros fueron espacializados de manera directa, para el caso de las aguas superficiales y se usó la interpolación Moving Average Inverse Distance para el caso de las aguas subterráneas. Se realizó una comparación espacio temporal de los parámetros fisicoquímicos con datos de los periodos: secos, de transición y húmedos, desde el 2007 al 2009. El principal metal proveniente de las actividades mineras, como ser principalmente colas y desmontes, es el zinc. Las caracterización de las aguas indica que las aguas de la zona minera son principalmente sulfato cálcicas, en cambio la zona agrícola presenta aguas cloruro sódicas y bicarbonato cálcicas. A través de la hidroquímica y la clasificación supervisada de imágenes satelitales de la cuenca, se encontró la relación existente entre el uso del suelo y la química de las aguas. En ese sentido las zonas con mayor impacto por la actividad minera comprenden desde el campamento Martha, Totoral y Avicaya, a lo largo del cauce principal de río hasta llegar al dique de Avicaya y de estas zonas, la más afectadas por esta actividad, es la zona sur de la cuenca, la localidad de Pazña, esta zona conforma la llanura de infiltración o inundación, su principal actividad (agrícola) se ve grandemente afectada por las actividades mineras desarrolladas en la parte alta de la cuenca.

INTRODUCCION

Según estudios realizados dentro de esta cuenca por parte de los Proyectos “CAMINAR” [2] y “Manejo de Recursos Hídricos - Hidroquímica de los lagos Poopó y Uru Uru - ASDI-SAREC” [3], Salinas [6] y Quintanilla [1] se estableció que la principal problemática que se manifiesta en esta cuenca es la presencia de metales pesados, siendo esta de gran magnitud, ya que existen yacimientos de minerales metálicos y no metálicos que se encuentran repartidos en las cordilleras Real, de los Frailes, Azanaques y Occidental. Salinas [6], indica que la mayor actividad minera de la cuenca se halla ubicada en la parte alta y desarrollada por la empresa minera Sinchi Wayra. A su vez Guisbert [4] en su modelización del transporte de hierro y plomo determinó que en los tramos de 10 000 a 14 000 m aproximadamente, se tiene mayor concentración disuelta de hierro transportado desde las partes altas de la cuenca Antequera que son depositados en los sedimentos. La espacialización de los posibles contaminantes de los cuerpos de agua dentro de una cuenca hidrográfica y la observación de sus cambios en función al tiempo, son de suma importancia para el análisis de la problemática, no solo desde el punto de vista técnico, si no también social, por las diferentes actividades que se realizan dentro de esta cuenca, a partir de estudios como el presente se podrían tomar medidas que coadyuvarían a la resolución de la problemática que sufren zonas con actividad minera y agrícola que forman parte de la cuenca. Las actividades mineras y los pasivos mineros casi siempre traen consigo un impacto negativo sobre el medio ambiente por el uso de aguas de curso natural, esta cuenca no es la excepción, la problemática que se manifiesta en esta zona, radica fundamentalmente en el deterioro de los cuerpos de agua de la cuenca. Este se agudiza por la diferencia de intereses de las poblaciones a lo largo de la cuenca, es así que las poblaciones de la cuenca alta como Martha, Totoral y Avicaya son enteramente mineras, es decir viven de la minería directa o indirectamente, gran parte de su población vive del rescate de minerales o trabaja en las minas en funcionamiento como Martha o Bolívar. Si bien las actividades mineras en Avicaya y Totoral cesaron en gran parte, sus pasivos mineros son un constante aporte de metales a las aguas del río Antequera. La parte baja de la cuenca (Pazña) tiene a la agricultura como su fuente de ingresos.

Geoestadística.- La geostatística reconoce que los fenómenos naturales están sujetos a la variación espacial. La geoestadística ha sido definida por G. Matheron como “La aplicación de métodos probabilísticos para variables regionalizadas”, la cual designa cualquier función desplegada en el espacio real. A diferencia de la estadística convencional, cualquiera que sea la complejidad y la irregularidad de un fenómeno real, la Geoestadística busca exhibir una estructura de correlación espacial [7].

Modelo espacio temporal.- La creciente necesidad de manipular datos espaciales (mapas) que cambian a través del tiempo, ha llevado al planteamiento de varios modelos espacio-temporales que puedan manipular estos tipos de datos. Un modelo los fenómenos geográficos que son definidos en términos de tres vistas: basado en localizaciones (location-based) (dónde), basado en objetos (entity-based) (qué) y basado en tiempo (time-based) (cuándo) [9].

Clasificación de imágenes.- Es el proceso de ordenar píxeles en un número finito de clases individuales, o en categoría de datos basados en sus valores. Si un píxel satisface una serie de criterios, entonces se le asigna a dicho píxel la clase que corresponde a ese criterio. Existen dos maneras de clasificación de píxeles en diferentes categorías: 1° clasificación supervisada que ofrece un mayor control que la clasificación no supervisada. En este proceso se selecciona píxeles que representan características reconocidas por el operador o que puede identificar con ayuda de otras fuentes. 2° clasificación no supervisada es más automatizada, le permite especificar parámetros que la computadora acostumbra usar como pautas para revelar modelos (o patrones) estadísticos en los datos [11].

DICUSION Y RESULTADOS

Análisis hidroquímico

Se puede apreciar que las aguas superficiales que atraviesan esta zona a través del curso de agua principal de la cuenca (Figura 1), presentan elevadas concentraciones de zinc y hierro. El pH tiene una relación inversa con el zinc y los sulfatos, es decir que desciende (pH ácido) cuando se incrementa la concentración de zinc y sulfatos en el agua. La conductividad se incrementa a lo largo del curso del río, es decir se tiene más sales disueltas en el agua, lo que incrementa la conductividad eléctrica del agua. Los iones predominantes en el agua superficial son el sulfato y el calcio. La parte agrícola correspondiente a Urmiri, presenta otra química en sus aguas, no se tiene concentraciones elevadas de metales pesados aparentemente, los iones predominantes son los cloruros, sulfatos, bicarbonatos, sodio y calcio. El pH tiene un ligero incremento hacia la alcalinidad, la conductividad es baja, en los puntos URR2 y URR1

(río Urmiri), que se encuentran antes de mezclarse con las aguas termales del lugar, luego de esta mezcla la conductividad se incrementa notoriamente, esto se debe al aporte de sales de las aguas termales.

Las aguas subterráneas estudiadas en esta zona presentan metales pesados en bajas concentraciones como ser el hierro y el manganeso, pero se hace notoria la presencia de zinc en las vertientes (TOTV2 y HUV1), tanques de agua (TOTT1) y el dique de colas (BODI1).

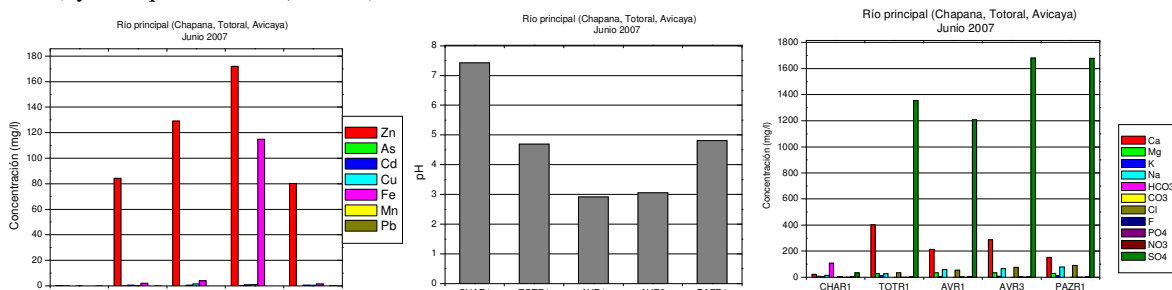


Figura 1. Diagramas de barras para la comparación iónica – Junio 2007

siguiendo más o menos el mismo comportamiento de las aguas superficiales. El pH de las aguas subterráneas está dentro del rango de la neutralidad, la conductividad es relativamente baja, con excepción de la vertiente TOTV2. Los iones predominantes son los sulfatos, bicarbonatos, cloruros y sodio. La parte baja de la cuenca, que es la parte de las llanuras, tiene concentraciones considerables de manganeso disuelto en sus aguas subterráneas y en el agua termal (PAZTE) de Pazña, se tiene además concentraciones elevadas de hierro. En este sector la salinidad de las aguas se presenta en gran medida, los iones responsables son principalmente el sodio y el cloruro. El agua termal de Urmiri (URLT1) como se esperaba tiene concentraciones elevadas de hierro, manganeso, cloruros y sodio. Como se conoce las aguas termales son ricas en metales por el origen que tienen.

Comparación por épocas

Se puede apreciar que la muestra tomada en Pazña (zona llanura) tiene principalmente al zinc como su elemento predominante, este cambia en el tiempo de tal forma que en la época seca baja su concentración y en la época húmeda incrementa su concentración, se puede indicar que existe disolución de minerales de zinc por efecto de la precipitación. Se observa también que en este periodo se incrementó la concentración de sulfatos, esto probablemente por el drenaje ácido de mina y las malas prácticas en la explotación de minerales en esta zona.

Los iones predominantes en la zona alta son el sulfato, calcio, cloruro y sodio, en ese orden de importancia (Figura 2). Por el contrario la zona baja tiene al sodio, cloruro, sulfato y calcio como sus iones predominantes. El incremento en las concentraciones de zinc en la parte alta minera de la cuenca tiene como principal fuente a la lixiviación de las estructuras superficiales [13], esto demuestra la clara influencia minera sobre el recurso hídrico de esta zona.

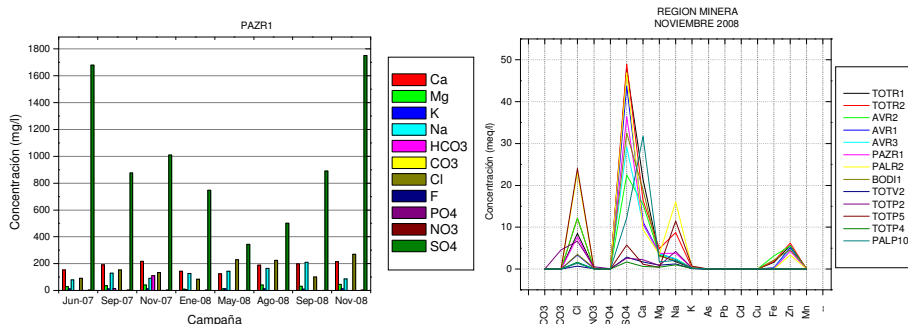
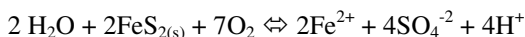


Figura 2. Diagramas de barras para la comparación iónica – PAZR1 (Pazña) y Diagrama Scholler para la zona alta de la cuenca

En la parte cercana al campamento Martha se puede apreciar como el pH es influenciado por la época, es decir en el periodo húmedo baja el pH, esto indica que los residuos mineros lixivian con el agua de la lluvia sulfuros metálicos

que acidifican más el agua del principal curso de agua [14]. En ese sentido se puede entender mejor el impacto de los metales, a las actividades que se desarrollan en una cuenca con el siguiente ejemplo. Los desechos de la actividad minera, colas y desmontes, normalmente cuando están en contacto con el agua reaccionan y liberan metales en sus diferentes formas, por ejemplo la Pirita:



Como se aprecia en la reacción anterior, la Pirita (sulfuro de hierro) al reaccionar con el agua en un medio oxidante, libera distintos iones que pueden seguir provocando más reacciones de acuerdo al medio donde se encuentren, los iones hidrogeno liberados ocasionan la acidez del agua, esta ocasiona problemas a los distintos usos que se le da al agua, como por ejemplo la agricultura. Ahora bien la concentración elevada de sulfatos podría tener este mismo origen, como se aprecia en la anterior reacción los minerales sulfurados en su oxidación liberan iones sulfato. En toda la parte alta de la cuenca donde se encuentran los pasivos mineros, el alto contenido de sulfatos, además indica que podría haber drenaje ácido de mina, ya que como sabemos la presencia de sulfatos es signo de este drenaje [14].

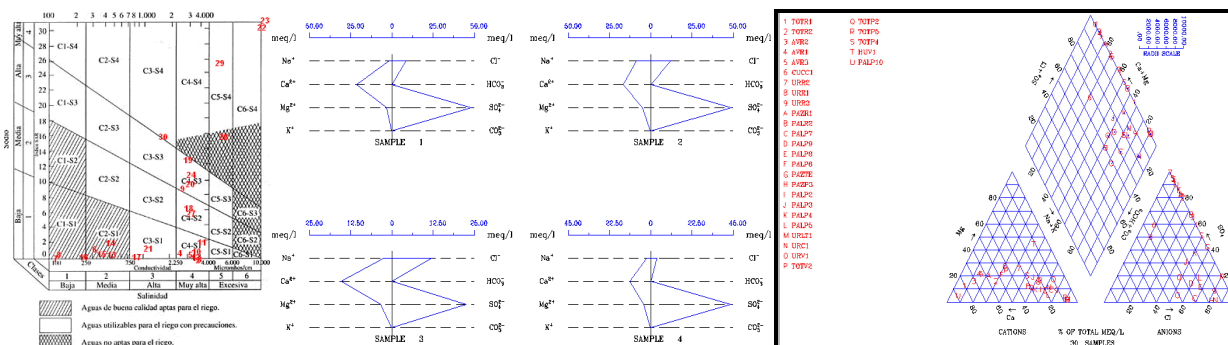


Figura 3. Diagrama Wilcox – Diciembre 2008, Diagramas Stiff y Piper – Noviembre 2008

Relación de Adsorción de Sodio (RAS)

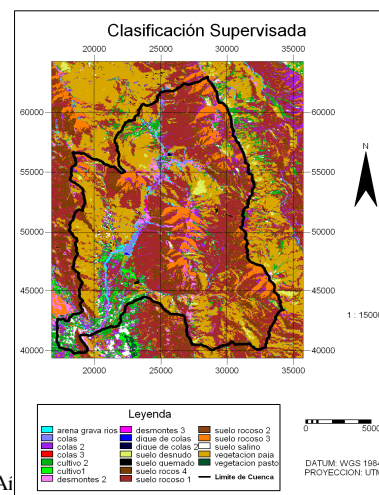
Algunas muestras de Noviembre 2008 presentan concentraciones de sodio elevadas, lo que las hacen no aptas para riego, por ejemplo el agua termal de Urmiri (URLT1). De igual forma algunas muestras de Diciembre 2008 y Febrero 2009 presentan concentraciones de sodio elevadas, lo que las hacen no aptas para riego. Las muestras que tienen salinidad alta de acuerdo a las Normas Riverside [12], deben esta característica principalmente a los sulfatos, cloruros, sodio y calcio (Figura 3).

Clasificación de imágenes satelitales

La arena y la grava fina forma una categoría de clasificación, estas se presentan principalmente en el curso de las aguas superficiales (arena, grava, río). Las colas productos residuales de las actividades mineras se presentan en la parte alta de la cuenca, en este caso se categorizó a tres tipos de colas, que consisten principalmente en complejos metálicos sulfurados, en la visita al campo se observó colas amarillentas (colas 3), colas plomizas (colas) y colas rojizas (colas 2).

También se observó los desmontes extraídos de las minas, que se encuentran a la intemperie, sujetos al agua de la lluvia y al viento (desmontes 2 y 3). Existen dos diques de colas, uno en funcionamiento, que pertenece la empresa minera Bolívar (dique 2) y otro en la localidad de Avicaya que aparentemente no tiene un mantenimiento adecuado (dique 1).

Se tiene también actividad agrícola al sur de la cuenca (cultivo 1 y 2). La vegetación dominante en la cuenca es la paja brava (vegetación paja brava) y en segundo lugar algunas zonas con pastos y arbustos muy pobres (vegetación pastos). Finalmente se tiene áreas donde se quemó la poca vegetación existente (suelo quemado) para uso agrícola, la parte sur de cuenca presenta áreas con suelos salinos (suelo salino) cerca de Pazña, algunas áreas sin ningún tipo de



vegetación (suelo desnudo) y todas las montañas existentes en el lugar (suelo rocoso 1, 2, 3 y 4). En la evaluación de la exactitud de la clasificación realizada en ERDAS 9.1, se obtuvo un 72,5 % de exactitud. La tabla de contingencias indica un 71,79% de precisión de la clasificación supervisada de imágenes realizada (Figura 4).

Figura 4. Clasificación supervisada de imágenes satelitales

Espacialización de datos (interpolación)

Como se aprecia en los mapas interpolados de las aguas subterráneas, la parte sur de la cuenca presenta un pH ligeramente básico en las aguas subterráneas, el agua superficial que atraviesa esta zona presenta pH más ácidos, por esta diferencia se puede indicar que no hay una interacción directa entre el agua subterránea y el agua superficial, al menos considerando los valores de pH.

Se puede indicar que las sales disueltas como se conoce tienen relación directa con la conductividad eléctrica (CE), es así que se tiene valores más bajos de CE en la parte alta y más altos en la parte baja, esto se puede explicar considerando el movimiento del agua superficial y subterránea, se sabe que el flujo subterráneo en esta zona es de noreste al suroeste, por ello el agua en su movimiento va disolviendo sales y minerales, ocasionando un incremento en los sólidos totales disueltos y por consiguiente en la conductividad eléctrica.

La parte suroeste de la cuenca presenta mayores concentraciones de arsénico, esto probablemente se debe la naturaleza del propio suelo, se conoce que el origen del arsénico en esta región (Pazña) presenta mayor concentración en las aguas subterráneas [5], las aguas termales al ser ricas en minerales podrían contener arsénico en sus aguas y en esta zona se tiene varias fuentes de agua de termal [15]. Se conoce que la contaminación de los acuíferos por estructuras contenedoras de minerales arsenicales depende principalmente de las concentraciones de arsénico contenido en las rocas, el tiempo y área de contacto entre las estructuras y las aguas subterráneas.

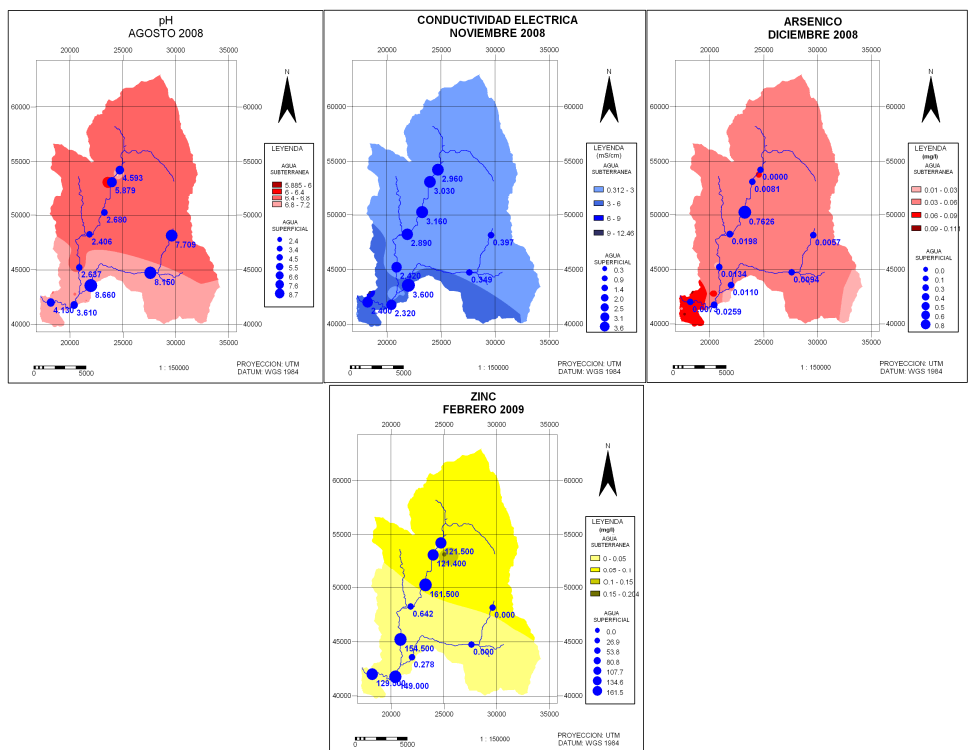


Figura 5. Mapas interpolados – pH, conductividad, arsénico y zinc

El hierro tiene mayor concentración en las partes altas esto probablemente porque el agua subterránea recibe lixiviados de las actividades mineras desarrolladas en la superficie [6], además que esta zona atraviesa formaciones geológicas ricas en minerales de hierro, como se conoce esta es una zona polimetálica [5]. El manganeso al igual que el arsénico tendría la misma fuente. Las fuentes antropogénicas de zinc son las principales fuentes de este metal en el agua superficial y subterránea [5].

Relación del uso actual del suelo y la química de los cuerpos de agua

En la figura 5 se observa como el pH cambia al pasar por la zona donde se encuentran las colas, desmontes y diques. Es decir la zona con actividad minera, el cambio radical de un pH de 8,17 en la localidad de Chapana, pasa a un pH igual a 3,71 en Avicaya y esta acidez se mantiene hasta Pazña, la salida de la cuenca. La conductividad eléctrica del agua también se incrementa luego de pasar por los diques de colas, colas y desmontes. La salinidad elevada que se tiene en el principal cauce de la cuenca, es atenuada por el ingreso de las aguas del río proveniente de la localidad de Urmiri, que al ser menos salinas, diluye de alguna forma las sales disueltas presentes. En la parte sureste de la cuenca que es la zona agrícola, el pH del río Urmiri es cercano a la neutralidad (8,34 – 8,42), a su vez la conductividad eléctrica es baja 0,29 mS/cm. Se evidencia nuevamente que el zinc presenta las concentraciones más elevadas de esta cuenca, es el metal predominante, junto al calcio y los iones sulfatos, especialmente en la parte con actividad minera. La concentración de las muestras tomadas en la parte baja de la cuenca PAZR1 (Pazña) bajan levemente, debido a que las aguas ácidas de la parte alta de la cuenca se mezclan con las aguas naturales de la parte agrícola de Urmiri (zona sureste de la cuenca). El hierro y el plomo del mismo modo sufren un incremento en sus concentraciones al pasar por Martha, Totoral y Avicaya, que con sus pasivos mineros y la actividad que desarrollan, lixivian metales al agua superficial, en particular en la época húmeda. La parte agrícola prácticamente no presenta metales disueltos, en las aguas superficiales.

Identificación de las zonas que sufren cambios en las concentraciones en función al tiempo

Como se aprecia en la figura 6, la zona que más cambios en sus concentraciones tiene en los periodos 2007, 2008 y parte del 2009, es la zona norte (alta) de la cuenca. Por el contrario la zona más estable en las concentraciones de sus iones en función al tiempo, es la subcuenca Urmiri, y finalmente la parte de la llanura (Pazña) es la que cambia dependiendo de las otras dos zonas, ya que es la receptora de las aguas de estas dos zonas.

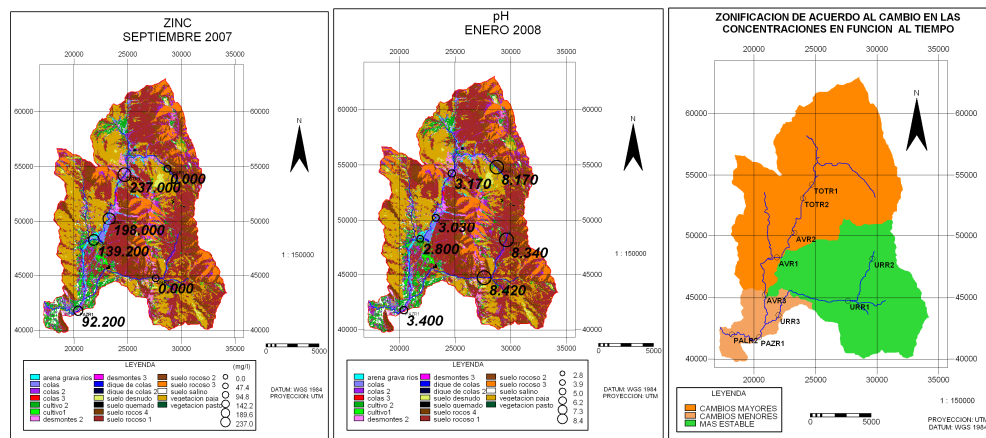


Figura 6. Relación del pH, zinc con el uso del suelo y las zonas de acuerdo a los cambios en las concentraciones en función al tiempo

Identificación de las zonas en las que mayor impacto provoca la actividad minera y la zona más afectada por esta misma actividad

En la figura 7 se observa cuales son las zonas que mayor impacto tienen por la actividad minera, como se ha visto la parte más problemática empieza en el campamento Martha y termina en la parte sur de Avicaya, justo a la salida del dique de colas (zona 4). A partir de este dique de colas el agua no recibe más minerales, no hay lixiviación porque no hay más desmontes y colas, entonces esta zona es la que aún sufre el impacto de la minería pero en menor medida que la parte alta (zona 6). La zona 7 es la que se encuentra a continuación de la zona 4, si bien en esta zona no hay actividad minera y más bien tiene ya actividad agrícola, igual sufre el impacto de la zona 4, pero a diferencia de la zona 6, el cauce del río principal no atraviesa esta zona. Finalmente la zona 9 que es la llanura de infiltración o de

inundación, de la parte baja de la cuenca, es la que desarrolla actividad agrícola, si bien esta distante de la zona 4, el principal problema que tiene, es que el río principal (pH ácido) la atraviesa.

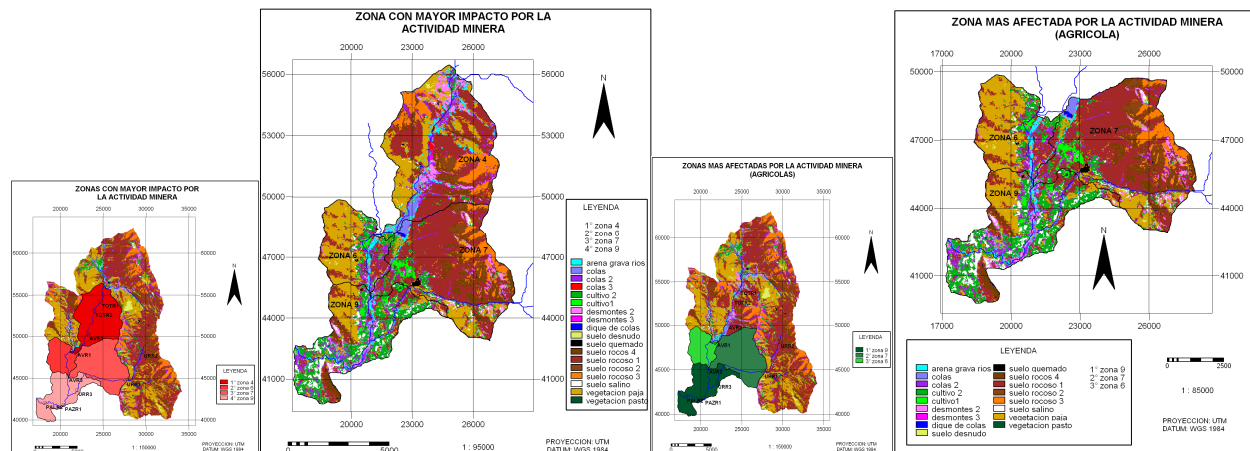


Figura 7. Zonas de mayor impacto por la actividad minera y la zona más afectadas esta actividad

Las zonas más afectadas por la actividad minera son la zona 9, 7 y 6 en ese orden, esto se entiende así, porque al ser la zona 9 la que se sustenta de otras actividades ajenas a la minería, como ser agricultura y criado de ganado ovino y vacuno, se ve más afectada que las otras zonas, porque su fuente de subsistencia es perjudicada, por las aguas ácidas y residuos sólidos que trae consigo el agua desde la parte alta de la cuenca, imposibilitando el uso del agua para cualquier actividad. Las zonas aledañas 7 y 6 son las que a continuación se ven afectadas por las actividades de la zona 4, sin recibir ningún beneficio, esto se menciona porque, es indudable que la zona 4 es la que más impacto sufre y sufrirá por las actividades que se desarrollan en esta zona, el daño ambiental es muy grande, pero las poblaciones de esta zona viven de esta actividad y no se dedican a otra actividad, por ello se podría señalar que no se ven tan afectadas como las poblaciones de la parte baja (zonas 9, 7 y 6).

SECCION EXPERIMENTAL

La cuenca Antequera se encuentra al suroeste del lago Poopó dentro del departamento de Oruro, se ubica entre los 18°16' y 19°44' latitud sur y 66°46' y 66°54' longitud oeste. La cuenca Antequera está ubicada en el Altiplano boliviano entre los 3 600 a 4 000 m.s.n.m., forma parte de la cordillera Azanaques y la cuenca del lago Poopó, tiene una superficie aproximada de 243 km². El río Antequera cruza la cuenca desde su parte alta (Martha), hasta la parte baja (Población de Pazña), es afluente del lago Poopó con una longitud aproximada de 18 km.

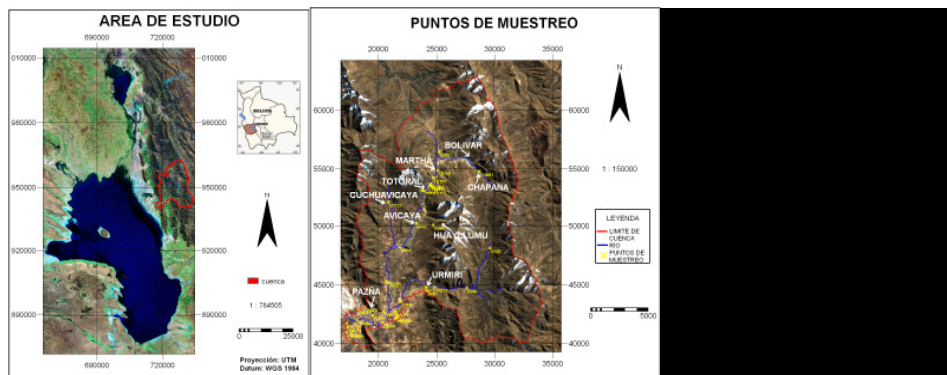


Figura 8. Área de estudio, puntos de muestreo y sus características

Tratamiento de datos

Se usó la base de datos producto de estudios e investigaciones realizadas en la cuenca Antequera, que fueron generados por distintas instituciones como ser: la cooperación europea con el Instituto de Investigaciones Químicas UMSA con el proyecto “Gestión de Cuencas Áridas y Semiáridas con Influencia Minera – CAMINAR”, durante los

años 2007-2009 en periodos secos, de transición y lluviosos, también la Cooperación Sueca ASDI-SAREC con el Instituto de Investigaciones Química UMSA con el Proyecto “Manejo de Recursos Hídricos-Hidroquímica de los Lagos Poopó y Uru-Uru” con datos del 2007 (periodos secos y lluviosos). Se contó con más de 35 puntos de estudio que implican todos los cuerpos de agua (aguas superficiales, subterráneas y termales) dentro del área de la cuenca, durante los periodos 2007 – 2009. Se tiene datos de 11 campañas de colecta de muestra: Junio 2007, Septiembre 2007, Noviembre 2007, Diciembre 2007, Enero 2008, Mayo 2008, Agosto 2008, Septiembre 2008, Noviembre 2008, Diciembre 2008 y Febrero 2009. Se analizó los siguientes parámetros fisicoquímicos: calcio, sodio, potasio, magnesio, sulfatos, bicarbonatos, cloruros, nitratos, fosfatos, arsénico, plomo, cadmio, zinc, hierro, cobre y manganeso, además de los parámetros de campo: pH, Conductividad Eléctrica y Sólidos Totales Disueltos. Todos los elementos fueron analizados en su estado disuelto. En la figura 8 se muestran los puntos de muestreo, el límite de cuenca, la red de drenaje y las principales poblaciones de la cuenca. También se puede apreciar la forma de la cuenca, con su parte alta montañosa y la parte baja más llana. Se sometieron los datos a un Análisis Exploratorio de Datos, mediante la hoja de cálculo XL-STAT 2009 extensión de Excel, para observar la tipología de datos y las relaciones existentes entre las variables. Se realizó el análisis por separado, para cada uno de los parámetros fisicoquímicos. Se siguió el procedimiento estipulado para este análisis, es decir se examinó gráficamente la naturaleza de las variables individuales, donde el análisis incluye el análisis descriptivo numérico que permita cuantificar algunos aspectos gráficos de los datos. Luego se reconoce gráficamente las variables del análisis descriptivo cuantitativo y el grado de interrelación existente entre ellas, se evaluó la normalidad de los datos y se identificó los posibles casos atípicos.

Obtención del límite de cuenca y red de drenaje a partir del Modelo de Elevación Digital (MED)

Se usó un MED de 30 metros de resolución espacial, obtenido de la página: www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp, este MED fue cortado y georeferenciado de acuerdo a la zona de estudio, usando la Proyección UTM, zona 19 sur y el Datum WGS 1984. Se usó del paquete ILWIS 3.3 con el procedimiento de DEM Hydroprocessing, que sirvió para extraer la red de drenaje y la delineación automática de subcuencas. Se obtuvo tres mapas, uno de microcuencas, otro de subcuencas y finalmente el de cuenca. Para extraer las microcuencas se usó un Umbral (Thershold) de 64000, (obtención de la red de drenaje), para las subcuencas se usó un Umbral de 256000 y para la cuenca un Umbral de 512000. Se realizó esta operación para usar estas delimitaciones en la zonificación de acuerdo a la hidroquímica y el uso actual (clasificación de imágenes) del suelo dentro del área de estudio.

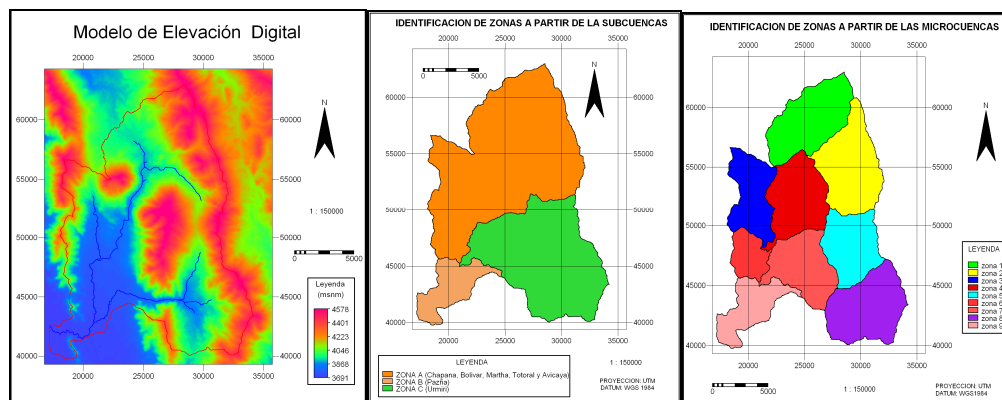


Figura 9. Red de drenaje, límite de cuenca, subcuencas y microcuencas obtenidos a través del DEM Hydroprocessing

Como se aprecia en la figura 9 el MED de la cuenca tiene cerros con alturas máximas próximas a los 4580 m.s.n.m., de la misma forma se aprecia que la parte baja de la cuenca tiene una altura de 3600 m.s.n.m. aproximadamente.

Clasificación de imágenes satelitales y recolección de puntos de verificación para la clasificación de las imágenes satelitales en campo

Para conocer cuál es el estado del suelo de acuerdo a los usos que se le da, se elaboró una clasificación de imágenes satelitales, usando para ello el paquete ERDAS 9.1. Se realizó primeramente una clasificación no supervisada usando

9 categorías, luego una clasificación supervisada con 19 categorías: arena-grava-ríos, 3 tipos de colas, dos tipos de cultivos, dos tipos de desmontes, dos diques de colas, suelo desnudo, suelo quemado, cuatro tipos de suelo rocoso, suelo salino y dos tipos de vegetación (pastos y paja brava). Se usó una imagen Landsat de 30 metros de resolución espacial, con 7 bandas, las bandas combinadas para la clasificación de imágenes satelitales fue 3-5-7, se eligió estas bandas para la mejor apreciación de la superficie de la cuenca. Luego de obtener la clasificación, se visitó la cuenca para identificar las categorías de clasificación y se las georeferenció para su posterior verificación con la clasificación supervisada obtenida anteriormente. A partir de estos datos tomados en campo se procedió a la evaluación la exactitud, mediante el procedimiento Accuracy Assessment de ERDAS 9.1 que permite comparar ciertos píxeles de su capa raster temática con píxeles de referencia para los cuales se conoce su clase real. Finalmente se elaboró un mapa de puntos, con los puntos de verificación tomados en campo en el paquete ILWIS 3.3, para obtener un mapa raster de estos puntos y cruzarlo con el mapa de la clasificación supervisada, para hallar una tabla de Contingencias o matriz de Confusión, para conocer la precisión de la clasificación realizada.

Análisis hidroquímico

Para el análisis químico se usó paquetes para elaborar gráficos de composición iónica de las muestras de agua de los puntos de estudio: ORIGIN 6.0 (gráficos Scholler y de comparación), PLOTCHER y GRAPHER V3.0 (gráficos de clasificación química Stiff, Piper y Triangulares de agrupación por similitud iónica). Primero se agrupó los diferentes puntos de estudio (ríos) de acuerdo a las campañas, considerando los principales ríos de la cuenca (río Chapana, Totoral, Avicaya, Cucho Avicaya y Urmiri). Para los otros cuerpos de agua (subterránea, termal y vertientes) se comparó de igual forma por campañas considerando tres zonas (alta: Bolívar, Totoral, Martha, Avicaya, parte media Urmiri y parte baja Pazña). Posteriormente se comparó en función al tiempo para cada punto de muestreo sobre los ríos principales, de igual forma se hizo para los otros cuerpos de agua, para cada zona. Se comparó gráficos Scholler para cada campaña considerando dos zonas: agrícola y minera. Finalmente se obtuvo gráficos Stiff, Piper por cada campaña, de todos los cuerpos de agua, observando su similitud iónica.

Se encontró la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) para todos los cuerpos de agua muestreados a partir de la siguiente ecuación [12]:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Na⁺ = Concentración de sodio en meq/l
Ca⁺⁺ = Concentración de calcio en meq/l
Mg⁺⁺ = Concentración de magnesio en meq/l

Se elaboró diagramas Wilcox a partir de los datos de Conductividad Eléctrica y RAS, esto permitió establecer la clasificación del agua según las normas Riverside para definir su calidad considerando al riego como uso del agua.

Espacialización de datos

Luego de analizar los datos a través de gráficos de interpretación química y de comparación en función al tiempo, para cada parámetro y para las distintas campañas, se procedió a espacializar los datos, para esto se separó las muestras en: subterráneas y superficiales. Las muestras de agua superficial se especializaron directamente, usando sus coordenadas sobre el límite de cuenca y la red de drenaje. Se observó los cambios de las concentraciones de los diferentes metales a lo largo de los cursos de agua. Las muestras de agua subterránea fueron tomadas de pozos someros ubicados en la cuenca, se interpoló estos puntos aplicando Geoestadística, en el software ILWIS 3.3, para encontrar el mejor método de interpolación, a través de tablas de bondad, para hallar la mejor correlación entre los datos reales y los interpolados. Se probó 3 tipos de interpolaciones: Moving Average, Trend Surface y Moving Surface. Con sus diferentes variables: Linear Decrease, Inverse Distance y distancia limitante. El resultado de la correlación del tratamiento geoestadístico realizado se observa como producto de las tablas de Bondad de ajuste. El método de interpolación elegida de acuerdo a las tablas de bondad es Moving Average Inverse Distance con una distancia límite de 15000. Se reclasificaron los mapas interpolados y se sobrepuso estos, a los mapas de puntos de las concentraciones de las aguas superficiales, observándose la relación entre ambos y los cambios en las concentraciones de los metales espacialmente.

Método de interpretación	pH	CE	As	Mn	Fe
MovingAverageLinear Distance (defecto)	0.1255	0.1782	0.1039	0.1376	0.5431
MovingAverageInverse Distance (defecto)	0.9762	0.9911	0.9945	0.9932	0.9965
TrendSurfacePlane (defecto)	0.1422	0.2237	0.7092	0.5322	0.6665
TrendSurface2grade (defecto)	0.3911	0.4013	0.8570	0.9900	0.8229
MovingSurfaceInverse Distance Plane (defecto)	0.9965	0.9997	1.0001	0.9905	1.0000
MovingSurfaceLinear Distance Plane (defecto)	0.8573	0.2451	0.8492	0.5792	0.8879
MovingAverageInverse Distance 15000 distancia límite	0.9725	0.9981	0.9945	0.9965	0.9965

Cuadro 1. Tabla de bondad (correlación del tratamiento geoestadístico) Agosto 2008

Análisis espacial en función al tiempo

Con los datos espacializados, se comparó los mapas de estos en función al tiempo, agrupándolos de acuerdo a cada parámetro. Para conocer la relación entre el uso actual de la cuenca y la hidroquímica se superpuso los mapas de concentraciones de cada parámetro, sobre el mapa de clasificación de imágenes de la cuenca. Usando el mapa de subcuencas obtenida del DEM Hydroprocessing y los mapas de las concentraciones de cada parámetro fisicoquímico en función al tiempo, se identifico las zonas que presentan más cambios en las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos estudiados a través del tiempo. Finalmente se usó el mapa de microcuencas obtenida del DEM Hydroprocessing, los mapas de análisis hidroquímicos y los mapas de clasificación de imágenes satelitales para el uso actual del suelo y se identifico las zonas de mayor impacto por la actividad minera y de estas las zonas más afectadas por la misma actividad.

CONCLUSIONES

La relación de adsorción de sodio (RAS) indica que las aguas de la parte sur de la cuenca son aptas para riego (vertientes y aguas subterráneas) con excepción de las aguas termales (por su elevado contenido de sodio) y las aguas ácidas. Las aguas de la parte norte de la cuenca se pueden usar pero tomando precauciones (vertientes y aguas subterráneas). Las aguas de la parte este de la cuenca, es decir la subcuenca Urmiri, son la más óptimas para el riego. La hidroquímica de las aguas es muy compleja especialmente en la parte alta de la cuenca, por la composición polimetálica de los desmontes y colas que se encuentran a lo largo del río principal, al ser la zona donde se desarrolla la actividad minera, presenta grandes cambios en las concentraciones de los metales pesados, pH y conductividad eléctrica.

Se identificó que el principal metal (elevada concentración) en las aguas superficiales es el zinc y en las aguas subterráneas es el hierro, manganeso y zinc. Los iones mayoritarios en la zona minera son el sulfato y calcio, por lo que sus aguas son sulfato cálcicas con preponderancia, la zona agrícola presenta aguas cloruro sódicas y bicarbonato cálcicas. Los metales disueltos tienden a incrementar sus concentraciones en los meses más húmedos, por lo que habría un fenómeno de disolución de minerales.

La zona que más cambios en sus concentraciones tiene en función al tiempo, empieza en la mina Bolívar, y prosigue en Martha, Totoral hasta Avicaya, donde se tiene muchos desmontes, colas y un dique de colas. La zona que más estable considerando las concentraciones de sus elementos químicos es la de Urmiri (sureste de la cuenca).

La zona que mayor impacto ambiental tiene por la actividad minera es la que comprende desde el campamento Martha, Totoral y Avicaya, a lo largo del cauce principal de río hasta llegar al dique de Avicaya. La zona que es más afectada por la actividad minera, se encuentra es la zona de Pazña al sur de la cuenca, la parte de la llanura de infiltración o inundación, porque su principal actividad (agrícola) se ve grandemente afectada por las actividades mineras desarrolladas en la parte alta de la cuenca.

REFERENCIAS

- QUINTANILLA, J. Memoria del Seminario Taller: "Intercambio de experiencias en la región de los lagos Poopó - Uru Uru y sus áreas de influencia". Distribución de Metales Pesados alrededor del Lago Poopó (Instituto de Investigaciones Químicas, IIQ). UMSA-ASDI/SAREC. Oruro - Bolivia. 2006.
- GESTIÓN DE CUENCAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS CON INFLUENCIA MINERA - PROYECTO CAMINAR. Universidad de Newcastle - Instituto de Investigaciones Químicas - UMSA. La Paz-Bolivia. 2007-2009.
- COOPERACIÓN SUECA ASDI-SAREC - INSTITUTO DE INVESTIGACIONES QUÍMICA - UMSA. Manejo de Recursos Hídricos-Hidroquímica de los Lagos Poopó y Uru-Uru. La Paz - Bolivia. 2004-2007.

4. GUISBERT, E.
Trabajo de Grado: Transporte de metales pesados en aguas superficiales de las subcuencas Poopó, Pazña, Antequera y Urmiri, Oruro – Bolivia. De la Maestría en Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra, mención en “Evaluación de Recursos Hídricos”, CLAS – ITC – UMSS. Cochabamba – Bolivia. 2008.
5. MINISTERIO DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE Y SNM.
Proyecto Piloto Oruro (PPOe.- 002), Impacto de la Minería y el Procesamiento de Minerales en Curso de Agua y Lagos. Oruro – Bolivia. 1996.
6. SALINAS A. R.
UMSA – IHH – ASDI – SAREC. Tesis de Grado. Estudio geomorfológico del área de Antequera y Tacagua, departamento de Oruro. 2005
7. DALENCE, J.S.
Texto Guía: Modulo Principios de Modelamiento-Geoestadístico de la Maestría en Ciencias de la Geo-información y Observación de la Tierra, Mención Recursos Hídricos, 2009 CLAS – ITC – UMSS. Cochabamba – Bolivia. 2009.
8. [http://www.Cuencas Hidrográficas.ECOAGUA.htm](http://www.CuencasHidrográficas.ECOAGUA.htm). Perú
Ecoagua, 2004. Cuencas Hidrográficas, EducaSitios. Perú.
9. [http://www.Modelos Espacio-Temporales.htm](http://www.ModelosEspacio-Temporales.htm)
Peuquet,. Modelo de tres dominios ("Triad Framework"), CESIMO Centro de Simulación y Modelos. 1994.
10. SANDOVAL, M.R.
Presentación del tema: Análisis exploratorio de datos AED, del módulo Principios de Modelación –Geoestadística, de la Maestría en Ciencias de la Geo-información y Observación de la Tierra, Mención Recursos Hídricos, 2009 CLAS – ITC – UMSS. Cochabamba – Bolivia. 2009
11. AVILES, S. SUAREZ, N.
Presentación del tema: Introducción a ERDAS, del módulo Percepción Remota Avanzada, de la Maestría en Ciencias de la Geo-información y Observación de la Tierra, Mención Recursos Hídricos, 2009 CLAS – ITC – UMSS. Cochabamba – Bolivia. 2009.
12. BLASCO, D.
Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego. (U.S. Soild Salinity Laboratory). Laboratorio de suelos IRYDA. 1973.
13. UNIVERSIDAD AUTONOMA TOMAS FRÍAS, EMPRESA MINERA SINCHIWAYRA.
Diagnósticos Hidrológico e Hidrogeológico de la subcuenca Antequera, Informe Final, Potosí – Bolivia. 2006.
14. VERNON, L. y JENKINS, D.
Química del Agua, 1º edición México. 1990.
15. ESTRADA, F.
Estudio preliminar de la incidencia del arsénico en las aguas subterráneas con relación al medio físico natural en la región noroeste y suroeste de Nicaragua periodo 2001 -2002. Centro de Investigación y Estudios de Medio Ambiente, Nicaragua. 2003.