



ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL LAGO POOPÓ - URU URU APLICANDO HERRAMIENTAS SIG

*Israel Quino; Jorge Quintanilla **

Laboratorio de Hidroquímica, Instituto de Investigaciones Químicas, UMSA, C.P. 303, La Paz – Bolivia, Proyecto: “Gestión de Cuencas Áridas y Semiáridas con Influencia Minera – CAMINAR”

Keywords: *Índice de calidad, geoestadística, interpolación matemática.*

ABSTRACT

The spatialization of possible contaminants in bodies of water within the Lake Poopó and observing their changes according to time, are of utmost importance for the analysis of this problem, from this analysis can establish an index water quality, allowing assessment of water quality spatially throughout the basin. We assessed the quality of water in the Lake Poopó - Uru Uru, based on a water quality index that is obtained by taking into account a classification of the chemical analysis results with respect to the permissible limits considered in the development of CAMINAR project, these are expressed as a percentage of pure water and highly contaminated water ICA will close or equal to zero percent, while in the water in excellent condition index value will be close to 100%, this rate will apply tools for Geographic Information System (mathematical interpolation) for optimal viewing through maps that can be interpreted very simply by the general public. The water quality index spatialized throughout the basin, shows that agricultural areas have higher water quality, most mining areas have lower water quality and evidenced the phenomenon of dissolution of minerals and salts from the soil by groundwater and surface water.

*Corresponding author: hidroqui@gmail.com

RESUMEN

La espacialización de los posibles contaminantes de los cuerpos de agua dentro de la cuenca del lago Poopó y la observación de sus cambios en función al tiempo, son de suma importancia para el análisis de esta problemática, a partir de este análisis se puede establecer un índice de calidad de aguas, que permita apreciar espacialmente la calidad del agua en toda la cuenca. Se evaluó la calidad del agua en la cuenca del lago Poopó - Uru Uru, en base a un índice de calidad del agua que es obtenido teniendo en cuenta una clasificación de los resultados de los análisis químicos con respecto a los límites permisibles considerados en el desarrollo del proyecto CAMINAR, estos están expresados como porcentaje del agua pura; así el agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento, en tanto que en el agua en excelentes condiciones tendrá un valor del índice será cercano a 100%, a este índice se le aplico herramientas de Sistema de Información Geográfica (interpolación matemática) para su visualización más óptima a través de mapas que puedan ser interpretados con mucha sencillez por el público en general. El índice de calidad del agua espacializado de toda la cuenca, muestra que las zonas agrícolas presentan aguas de mejor calidad, las zonas con mayor actividad minera presentan menor calidad de sus aguas y se evidencio el fenómeno de disolución de minerales y sales del suelo por parte del agua subterránea y superficial.

INTRODUCCION

El incremento de la contaminación de los cuerpos de agua en general ha hecho que en las últimas décadas se realicen numerosas investigaciones en torno al índice de calidad del agua, los cuales buscan generar programas de control y vigilancia de la calidad de las aguas [4] y [5]. Aunque en nuestro medio existen muchas investigaciones reportadas sobre el índice de calidad de aguas, estas en su mayoría son muy localizadas. En un estudio comparativo realizado con investigaciones de distintos países respecto a índices de calidad de aguas, se indica que los parámetros regularmente utilizados para la valoración de la calidad del agua son los fisicoquímicos [3]. En la cuenca de los lagos Poopó y Uru Uru se realizan diferentes tipos de actividades desde mineras hasta agrícolas, las actividades mineras y los pasivos mineros traen consigo un impacto negativo sobre el medio ambiente por el uso de aguas de curso natural, en esta cuenca la problemática principal radica fundamentalmente en el deterioro de los cuerpos de agua debido a la actividad minera y como consecuencia se tiene la presencia de metales pesados en gran magnitud [2]. La

especialización de los puntos de muestreo y sus características, así como los posibles contaminantes de los cuerpos de agua dentro de una cuenca hidrográfica, son de suma importancia para el análisis de esta problemática, además de la observación de sus cambios en función al tiempo. A partir de este análisis se puede establecer un índice de calidad de aguas (ICA), que permita apreciar espacialmente la calidad del agua en toda la cuenca. En el presente trabajo se analiza la situación de la calidad del agua en la cuenca del lago Poopó - Uru Uru, en base a un índice de calidad del agua obtenido a partir de parámetros fisicoquímicos, aplicando herramientas de Sistema de Información Geográfica (interpolación matemática) para su visualización más óptima. Existen distintas técnicas de interpolación matemática que pueden ser utilizadas para generar estas superficies de valores estimados a partir de un conjunto de puntos de monitoreo ubicados en distintos lugares del área de estudio. La calidad del resultado depende de muchos factores uno de los cuales es la propia naturaleza del fenómeno estudiado. Hay sistemas y fenómenos que presentan comportamientos regulares en el espacio y en el tiempo que son más fáciles de estudiar; otros son fenómenos que contienen un componente muy importante de aleatoriedad. Claro que otro aspecto muy importante para estudiar y prever la distribución de estos fenómenos es la calidad de la red de monitoreo, su distribución espacial y temporal, su representatividad con respecto a la escala del fenómeno y la fiabilidad de los datos [6]. El resultado de la aplicación de estas metodologías a un conjunto discreto de puntos con datos de monitoreo, permite generar una distribución de valores de la variable continua para todo el área de estudio. Los mapas resultantes de estas distribuciones son muchas veces la base del análisis de riesgos, de la toma de decisiones económicas y de las estimaciones que impliquen como variable la incertidumbre asociada al fenómeno natural y que permitan a los analistas tomar decisiones científicamente más sólidas.

Calidad del agua

El término calidad del agua es relativo, referido a la composición del agua en la medida en que esta es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas. [10]

Técnicas de interpolación matemática

En un contexto general las herramientas de interpolación son utilizadas para estudiar y evaluar algún fenómeno que ocurre en un medio natural que nos interesa (por ejemplo, la contaminación del suelo, del agua o del aire o el contenido de oro u otro metal en un área). Los estudios exhaustivos son muy costosos y requieren mucho tiempo, así que el trabajo se caracteriza en general por la toma de muestras en diferentes lugares. Las técnicas de interpolación se utilizan para generar las predicciones de los valores y estructura del fenómeno en las restantes áreas no muestreada [6].

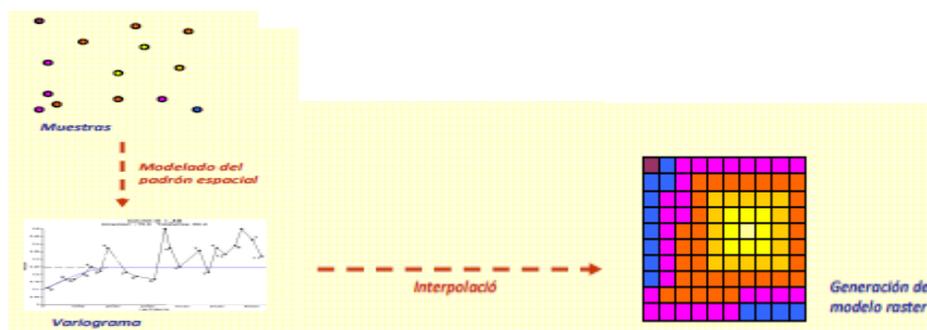


Figura 1. Proceso de interpolación

Índice de Calidad del Agua

El Índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así el agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento, en tanto que en el agua en excelentes condiciones tendrá un valor del índice será cercano a 100% [6].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación de los puntos de mejor y menor calidad de agua dentro de la cuenca

Se espacializó los datos promedio de todas las campañas, como se aprecia en la figura 2. Se muestra claramente que los puntos de muestreo en la zona norte y noreste de los alrededores del lago Poopó tienen menor porcentaje de calidad en sus aguas, los círculos verdes son los de mayor calidad y los rojos son los de menor calidad. Es así que las zonas con mayor actividad minera (Antequera, Poopó, Pazña) presentan mayor cantidad de puntos anaranjados y rojos. La calidad dentro el lago Poopó sur, muestra claramente puntos rojos, lo que indica que la calidad del agua de este cuerpo es baja. Muchos puntos de muestreo presentan color verde (Paria, Soracachi, Urmiri, Challapata, Huari, entre otros), estas zonas donde se practica agricultura, tienen mayor calidad en sus aguas (mayores porcentajes de calidad).

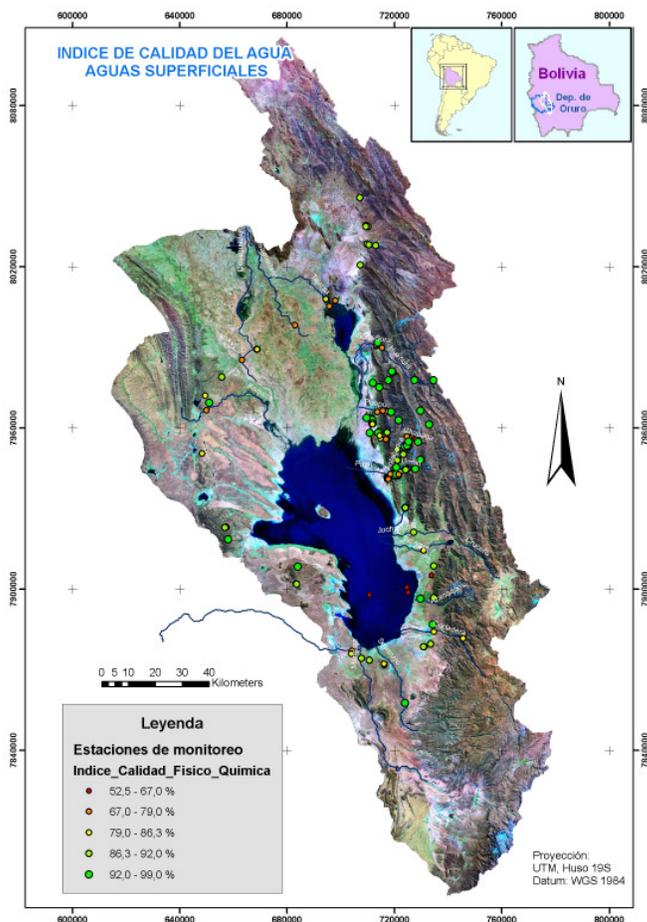


Figura 2. Mapa de índice de calidad del agua de las aguas superficiales

Determinación de la variación de la calidad del agua en base a la variabilidad climática

En la figura 3 se aprecia que existe influencia de la variación climática en la calidad de aguas. Se evidencia un efecto de disolución de sales y minerales en los cuerpos de agua estudiados. Ya que se tiene mayores áreas de color verde intenso en el periodo seco, mientras que en el periodo húmedo se tiene mayores áreas de color verde claro y anaranjado. En el periodo seco se observa que la calidad del agua es superior en la zona norte, en las poblaciones de Paria, Soracachi y Cayhuasi. De igual forma en la zona noroeste Tolaloma, Kulluri y Copacabanita. Y finalmente en la zona sureste: Huari, Challapata, Tacagua, Siquiri, como se conoce son áreas agrícolas. La influencia de uno de los brazos del río Desaguadero es notoria sobre la región suroeste del lago Uru Uru (área de color anaranjado) en ambos periodos, el agua de este río estaría provocando que la calidad de las aguas de esta región disminuya. Un fenómeno parecido se observa en las orillas suroeste y este del lago Poopó, especialmente en el periodo húmedo. Por ello también las aguas del lago estarían provocando que la calidad de las aguas de esta región este disminuyendo. Esta idea se refuerza debido a que como se sabe las aguas del lago son de muy baja calidad.

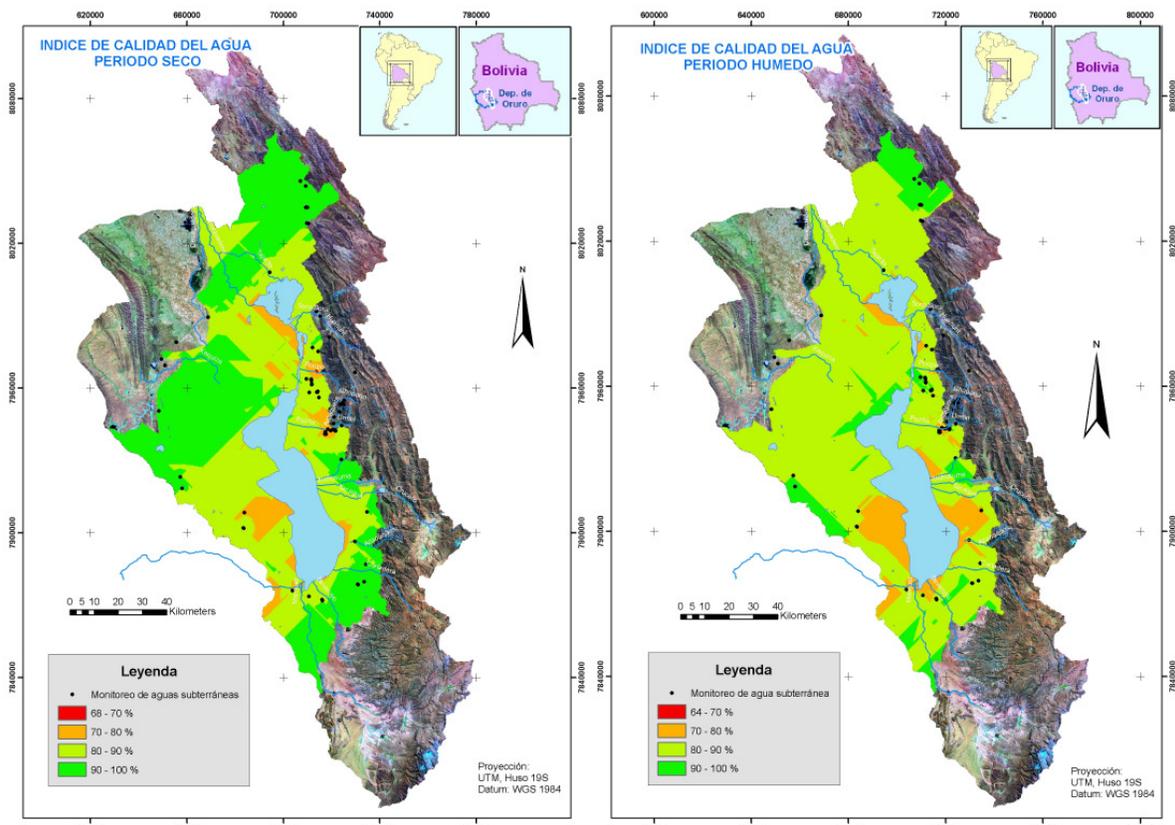


Figura 3. Mapas del índice de calidad del agua en los periodos seco y húmedo

EXPERIMENTAL

Descripción de la zona de Estudio

El área de estudio se encuentra en el departamento de Oruro que se ubica en el sector centro occidental de Bolivia, limitando al norte con el departamento de La Paz, al este con los departamentos de Cochabamba y Potosí, al sur con el departamento de Potosí y al oeste con la República de Chile. La cuenca del Lago Poopó y Uru Uru está ubicada en la parte central del Altiplano, entre las coordenadas $66^{\circ}20'$ a $67^{\circ}55'$ de longitud oeste $17^{\circ}07'$ a $20^{\circ}01'$ de latitud sur, sobre una elevación desde 3600 en la llanura a 5 400 m.s.n.m. en la parte de la cordillera oriental; la superficie total es de 24 013 km². Típicas del altiplano meridional son las cuencas cerradas de lagos y salares, con depósitos evaporíticos muy importantes. Estas cuencas representan los restos actuales de los grandes lagos altiplánicos del pleistoceno: periodos lacustres Tauca y Minchin. En el centro de la cuenca Poopó se tiene la planicie aluvial comprendida entre los 3700 m en el norte y 3600 m hacia el sur, en esta altiplanicie escurren sus aguas el río Desaguadero y sus efluentes al norte para formar los lagos Uru – Uru y el Lago Poopó más hacia el sur. El sector oriental de la cuenca del lago esta conformado en su mayor parte por vertientes sedimentarias disectadas de la Cordillera Oriental, salvo en el extremo sureste donde afloran las rocas volcánicas. Este sector montañoso se caracteriza por un denso retículo hidrográfico favorable a un escurrimiento rápido. La zona central y occidental de la cuenca está conformada, además del lago, por llanuras y terrazas fluvio-lacustres, con áreas de acumulaciones eólicas, las cuales moderan la velocidad de las aguas. Estas llanuras, pero especialmente sus áreas mas deprimidas, están sujetas a inundaciones periódicas y variables en las épocas de lluvias [1].

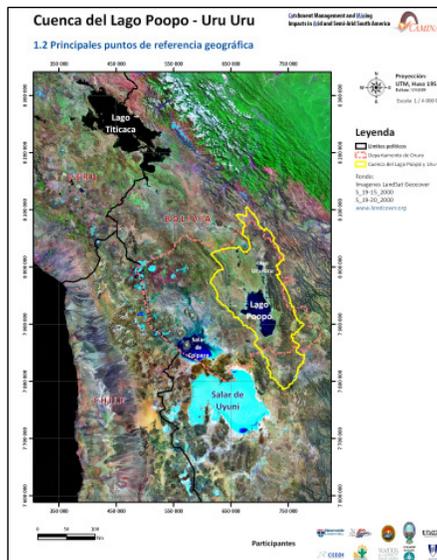


Figura 4. Área de estudio

Base de datos

Se usó la base de datos producto de estudios e investigaciones realizadas en la cuenca de los lagos Poopó y Uru Uru, 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 Químicas 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 120 puntos de muestreo que implican todos los cuerpos de agua (aguas superficiales, subterráneas y termales) dentro del área de la cuenca, durante los periodos 2001 – 2009. Se tiene datos de 16 campañas de colecta de muestra: dos en 2001, dos en 2002, uno en 2003, 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 (STD). Todos los elementos fueron analizados en su estado disuuelto.

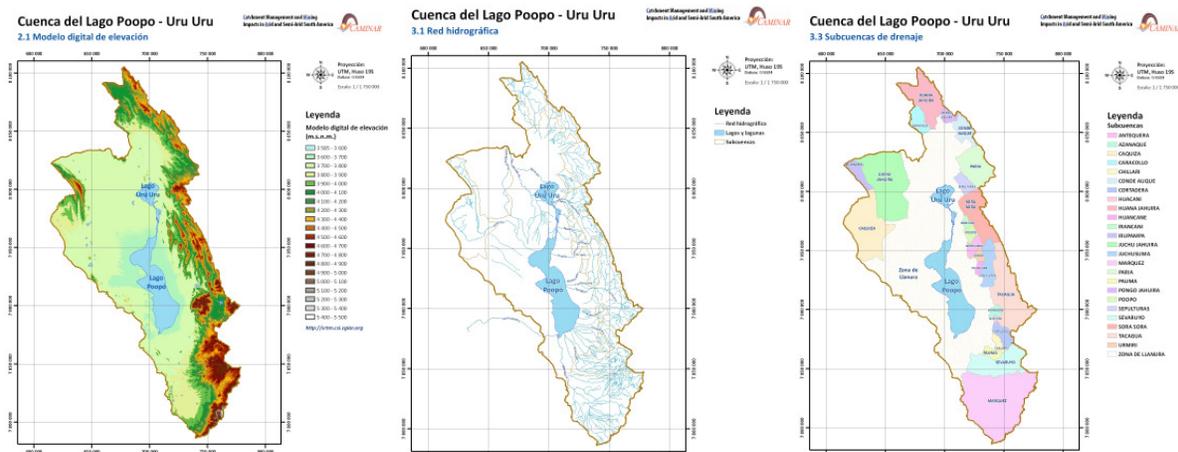


Figura 5. Modelo de elevación digital, red de drenaje y subcuencas de drenaje de la cuenca del lago Poopó – Uru Uru



Aplicación del índice sintético de calidad del agua desarrollado por el proyecto CAMINAR

Este índice permite obtener una medida de la calidad del agua que se pueda aplicar y calcular automáticamente teniendo en cuenta los datos disponibles del monitoreo químico, su periodicidad, la variabilidad de los puntos muestreados y la variabilidad de parámetros analizados. El índice es obtenido teniendo en cuenta una clasificación de los resultados de los análisis químicos con respecto a los límites permisibles considerados en el desarrollo del proyecto CAMINAR para el caso de estudio de la cuenca del Lago Poopó.

- Los valores de los límites permisibles utilizados en el desarrollo del proyecto, han sido compilados por el equipo de CAMINAR Bolivia, teniendo en cuenta la legislación nacional así como los valores indicativos de la OMS/OPS.
- En términos finales, a este conjunto específico de límites permisibles aplicado en el desarrollo del trabajo, se ha designado como: “Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (01/04/1996) de la Ley del Medio Ambiente N° 1333 (15/06/1996) [9] y la OMS (1997), adecuados a la realidad Boliviana, por Jorge Quintanilla Aguirre 2009 [7].
- La formulación del índice tiene en cuenta trabajos existentes en la cuenca del Lago Poopó, en particular el trabajo de Israel Quino (2006) – “Determinación de la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas en la región norte y este del lago Poopó”. Lic. Tesis. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, Carrera de Ciencias Químicas, con adaptaciones [8].
- Teniendo en cuenta el histórico de parámetros analizados, la frecuencia y su regularidad, se han elegido 20 parámetros para utilizar en el cálculo del índice de calidad: Temperatura, conductividad, pH, STD, alcalinidad total, fosfatos, nitratos, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, manganeso, arsénico, cobre, plomo, cadmio y zinc.

Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (01/04/1996) de la Ley del Medio Ambiente N° 1333 (15/06/1996) y la OMS (1997)*

LIMITES PERMISIBLES EN CUERPOS DE AGUA NATURAL

PARAMETROS	UNIDAD	CH	CA	R	PARAMETROS	UNIDAD	CH	CA	R
Temperatura	°C	9-15 ^a	SI	SI	Calcio	mg/l	200,00	SI	SI
Conductividad	mS/cm	0,1-1,00	1,5	1,5	Magnesio	mg/l	100,00	SI	200
PH	----	6,5-8,5	6,5 9,0	5,5-9,0	Sodio	mg/l	120,00	200	300
Color aparente	Pt/Co	Mai-50	70	50	Potasio	mg/l	1000,00	SI	SI
Turbidez	FTU	5,00	SI	20	Hierro	mg/l	0,30	1,00	5,0
T,D,S	mg/l	500-1500	5000	500-3500	Manganeso	mg/l	0,30	1,00	0,50-5,0
M,E,S,	mg/l	25,00	SI	70	Arsénico	mg/l	0,05	0,2	0,1-2,0
Dureza	°d	25	SI	SI	Cromo (6+)	mg/l	0,05	1,00	0,10
Oxígeno Disuelto	mg/l	>4,0	>4,0	3,0-9,0	Wólfram-Tungsteno	mg/l	0,05	SI	SI
Tasa de Saturación	mg/l	SI	SI	SI	Cobre	mg/l	0,20	0,50	1,00
Alcalinidad Total	mg/l	610	SI	SI	Estaño	mg/l	0,002	SI	SI
HCO3	mg/l	SI	SI	280	Plomo	mg/l	0,05	0,10	5,00-10
CO3	mg/l	Solo a partir de PH 8,40	SI	75	Antimonio	mg/l	0,60	SI	SI
CO2 Libre	mg/l	SI	SI	SI	Mercurio Total	mg/l	0,0005-0,001	0,01	0,003
Fosfatos	mg/l	3,5	7,0	65	Plata	mg/l	0,05-0,10	SI	0,20
Nitratos	mg/l	40,00	50,00	40	Cadmio	mg/l	0,01	0,05	0,01
Nitritos	mg/l	1,00	10,00	SI	Cobalto	mg/l	0,05	0,10	0,05
Cloruros	mg/l	250,00	400	400	Níquel	mg/l	0,10	1,00	0,20-2,0
Sulfatos	mg/l	400,00	800	400	Bismuto	mg/l	SI	SI	SI
Sílice disuelta	mg/l	20,00	SI	SI	Zinc	mg/l	5,0	5,0	5,0
Cianuros	mg/l	0,05-0,10	0,10	0,10	Boro/BO3	mg/l	2,0/11,0	2,0/11,0	2,0/11,0

*In an adaptation by Jorge Quintanilla Aguirre, 2009

SI = Sin Información

CH = Consumo Humano; CA = Consumo Animal; R = Riego

Cuadro 1. Límites permisibles en cuerpos de agua natural

En la tesis de Quino el índice se basaba en 4 clases de calidad del agua; en el caso de CAMINAR, el índice tendrá en cuenta 3 clases de calidad del agua: consumo humano, consumo animal y riego. El número y parámetros utilizados también es distinto en resultado de las disponibilidades de datos existentes en los dos momentos, pero en gran parte



hay coincidencia. Por sugerencia del autor, se ha valorado la calidad del agua por parámetro de acuerdo con la siguiente escala:

- Cumple límites para consumo humano → calidad 1
- Cumple límites para consumo animal → calidad 0.66
- Cumple límites para riego → calidad 0.33
- No cumple ninguno de los límites → calidad 0

Formulación:

$$\sum(P_i \cdot Q_i) / i$$

P_i: es el impacto específico de un elemento químico de acuerdo con el tipo de uso de agua.

Q_i: es la clasificación de cada parámetro para cada muestra de acuerdo con la aplicación de los límites permisibles (LP). Este valor es 0 si la concentración está por debajo del límite y es 1 si es superior al límite permisible.

i: es el número del parámetro a ser utilizado en el índice (hasta un máximo de 20).

La formulación del índice de calidad se modificó para el modelo de datos de la base de datos de la siguiente manera:

Consumo humano	Consumo animal	Riego	Calidad (P _i *Q _i)
Superior al LP	Superior al LP	Superior al LP	0
Superior al LP	Superior al LP	Abajo del LP	0.33
Superior al LP	Abajo del LP	Superior al LP	0.67
Superior al LP	Abajo del LP	Abajo del LP	0.67
Abajo del LP	Abajo del LP	Abajo del LP	1

Cuadro 2. Clasificación de índice de calidad del agua

El proyecto diseño una modalidad para la entrega de informes a los interesados, en este caso el informe para los Municipios está organizado en tres niveles de detalle geográfico:

NIVEL 1 – Todo el territorio del Municipio.

NIVEL 2 – Los resultados por intersección de las subcuencas dentro del área del Municipio.

NIVEL 3 – Los resultados detallados para todos los puntos de monitoreo ubicados dentro del Municipio.

La estructura de los NIVEL 1 y NIVEL 2 del informe para los Municipios, tiene como objetivo presentar para el conjunto de puntos monitoreados, los cuales son los parámetros que más contribuyen para la contaminación y a través de los gráficos evolutivos de los distintos índices, dar una idea intuitiva y cualitativa de cómo la situación ha evolucionado.

Los documentos y gráficos del NIVEL 1 y del NIVEL 2 tienen el mismo tipo de lectura e interpretación, solamente el NIVEL 2 tiene mayor detalle geográfico y permite diferenciar distintas regiones del territorio de un Municipio.

Los informes del NIVEL 1 y NIVEL 2, contienen la siguiente estructura:

- Porcentaje de muestras que exceden los límites permisibles del reglamento de la Ley 1333 [9] y de la OMS dentro del Municipio.
- Evolución del nivel promedio de calidad del agua dentro del Municipio.
- Evolución del nivel promedio de indicadores de salinización (RAS y Conductividad) dentro del Municipio.
- Evolución del nivel promedio de contaminación del agua por metales pesados dentro del Municipio.



La estructura del NIVEL 3 del informe, presenta los resultados detallados de los análisis efectuados en cada punto de monitoreo. Sin embargo, si los valores están presentados en el informe, el objetivo no es que las personas de los municipios los sepan interpretar.

Al contrario, se utiliza una técnica de presentación de resultados únicamente visual, llamada “en semáforo”. A los usuarios de los Municipios lo que mas les interesa saber es, si hay muchos puntos verdes, la calidad del agua es buena y si hay muchos puntos rojos, la calidad es mala.

Espacialización de datos (interpolación)

Se elaboro mapas usando herramientas de interpolación en ambiente SIG (ArcGIS), de esa forma los porcentajes del índice de calidad obtenidos, se espacializan a través de una técnica de interpolación matemática denominada Kriging.

Geostatistical Analyst	Descripción
Parámetros para calculo del semivariograma	
Lag Size	Distancia de busca de muestras
Number of lags	Numero de pares de muestras
Modelo Teórico	
Nugget	Pepita
Partial Sill	Meseta
Major Range	Distancia máxima de influencia entre puntos / Alcance
Model	Spherical, Circular, Exponential, etc.

Cuadro 3. *Parámetros que se considera en la técnica de interpolación usada*

Se utilizo la extensión del ArcGIS “Geostatistical Analyst”, se empezó por preparar los datos para que se puedan trabajar con esta herramienta: Se abrió un mapa para la “Visualización de datos de análisis físicoquímicos y presentación de mapas en ArcGIS”.

Primero se agrego información general, como el entorno de la cuenca, el lago y la ubicación de las estaciones de la red de monitoreo físico-químico.

En la “Visualización de datos de análisis físicoquímicos y presentación de mapas en ArcGIS”, se cargo las estaciones de distintos tipos (aguas superficiales, aguas subterráneas, etc.), a partir de la misma “feature classe”, pero en distintos “layers” del mapa y con distintas simbologías.

Se uso las tablas de la base de datos que presentan los resultados del monitoreo químico, expresados porcentaje de calidad de aguas, para espacializarse en un mapa. En este caso se uso las tablas:

- ESTACIONES_CALIDAD_NUMERIC_PHUMEDO
- ESTACIONES_CALIDAD_NUMERIC_PSECO

En estas tablas se presentan los valores promedio de los distintos parámetros físicoquímicos en los meses del período húmedo y seco.

Luego se define nuevas conexiones entre los puntos de monitoreo y las tablas que se han cargado.

- Red de monitoreo de aguas subterráneas (en pozos)
- Datos promedio del período húmedo.
- Join & Relate >> Join

También se definen los atributos de relación:



- El HydroID de los puntos de monitoreo es igual al FeatureID de la tabla de datos físicoquímicos

Con esta relación entre la capa de las estaciones de monitoreo del agua subterránea y los valores promedios de los distintos parámetros físicoquímicos del periodo húmedo, se obtiene una relación de $1 \Leftrightarrow 1$ (a cada estación corresponde un único valor de cada parámetro).

Shape	OBJECTID	MonitoringP	Codigo	Nombre	Tipo_Muest	Tipo_Muest	MonitoringP	MonitoringPoint.Alti	Alcalinidad	Arsénico_m	Bicarbonato	Cadmio_mg	Calcio_mg_l	Carbonat
Point	213	96	PAZP2	Pazfia	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3732	<Null>	0.0642	300.204132	0.0012	114.275	
Point	214	97	PAP1	Paria	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		102.01564	0.026167	239.187032	0.024133	78.183333	
Point	215	98	SORP1	Sora Sora	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3775	0	0.005	0	0.5895	120.15	
Point	216	99	PAMP1	Pampahullagas	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3712	0	0.133855	109.83078	0.047	72.7125	
Point	217	100	PASB1	Paria	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		685.36252	0.02083	451.52766	0.024133	51.555	
Point	218	101	GUP1	Quillacas	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3717	395.3923	10.2371	314.848982	0.0356	37.085	
Point	219	102	GUP2	Quillacas	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3797	0	0.084825	18.30513	0.046	8.458	
Point	220	103	SIP2	Siquiri	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		219.6624	0.02846	219.6624	0.07	25.02	
Point	221	104	SOP1	Soracachi	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3750	589.42654	0.011747	535.32426	0.024133	60.1	
Point	222	105	SOP2	Soracachi	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3750	<Null>	19	417.356964	0.0012	56.275	
Point	224	107	THP1	Tholapampa	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3727	154.576933	0.020517	154.576933	0.024133	30.1	
Point	225	108	TOLP1	Tololoma	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		336.8157	9.66723	301.425128	0.0356	99.45	
Point	226	109	TOP1	Toledo	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		497.9014	0.16809	384.408662	0.045	67.9625	
Point	227	110	TOP2	Toledo	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		168.40785	0.214027	200.136524	0.024133	127.775	
Point	228	111	COP1	Copacabanita	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		97.62736	4.456057	128.542691	0.024133	235.7	
Point	229	112	ANP1	Andamarca	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3761	398.86233	6.808905	370.984779	0.024133	127.533333	
Point	230	113	AVP1	Avaroa	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3761	434.44278	0.040767	386.442319	0.024133	85.091667	
Point	231	114	CALLP1	Callipampa	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3726	122.0342	0.009273	130.169813	0.0012	43.896667	
Point	232	115	CALLP2	Callipampa	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		134.23762	0.005	152.567157	0.0181	57.8875	
Point	233	116	CALLP3	Callipampa	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3731	85.42394	0.01322	85.42394	0.0012	37.545	
Point	234	117	CARP1	Caraynacha	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3741	292.8832	0.073215	232.475711	0.0356	41.1025	
Point	235	118	CAP1	Cayhuasi	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		317.28892	0.008818	398.645053	0.024133	75.183333	
Point	236	119	CAYP1	Cayumalliri	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3867	151.83722	1.177003	141.55952	0.0012	68.6	
Point	237	120	CHAP1	Challapata	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3744	79.32223	0.013067	98.034141	0.024133	56.258333	
Point	238	121	CHP1	Chusaqueuri	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		0	0.01779	51.254364	0.024133	167.05	
Point	239	122	KEP2	Kesukesuni	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		126.01932	0.02293	0	0.0012	122.925	
Point	240	123	CONP4	Condo K	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3729	366.104	0.17102	296.543806	0.0356	43.765	
Point	241	124	LLAP1	Llapallapani	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3711	62.23761	0.031813	56.135844	0.024133	11.673333	
Point	242	125	CORP1	Corviri	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		244.0684	0.01597	244.0684	0.0012	106.05	
Point	243	126	HJAP1	Huancane	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3710	158.84446	0.019523	203.390333	0.024133	66.35	
Point	244	127	HLP1	Huari	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>	3761	108.01656	0.005	0	0.0012	3.795	
Point	245	128	IRP1	Irukasa	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		128.13591	0.016222	283.119344	0.024603	36.558333	
Point	268	151	PALP8	Pazfia	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		427.1197	0.007776	427.1197	0.0012	168.2	
Point	269	152	PALP9	Pazfia	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		414.91628	0.005	414.91628	0.0012	167.8	
Point	270	153	PALP6	Pazfia	Estacion Calid	Aguas Subter	<Null>		146.44104	0.01044	146.44104	0.0012	105.4	

Cuadro 4. Tabla de atributos de las concentraciones de los parámetros (ArcGIS)

En seguida se inicia el análisis geoestadístico. Como en el procedimiento antes explicado, los primeros pasos son el calculo del semivariograma experimental (o empírico) y luego el ajuste del modelo teórico que explica el comportamiento espacial de la variable.

Para el análisis geoestadístico, se utiliza el “Geoestatistical Wizard”.

Todos estos valores y parámetros pueden ser obtenidos por defecto u omisión, en el ArcGIS. El usuario si desea puede definir sus propios parámetros y valores, solo hay que editarlos.

Cuando se experimentan distintos valores de los parámetros del modelo, en el gráfico los puntos y el modelo teórico ajustado cambian y así se puede evaluar de la calidad del modelo.

Otro aspecto que se puede probar es la anisotropía, o sea, ver si el comportamiento de la variable es igual en las distintas direcciones del espacio.

El mapa es producido en un nivel de información temporáneo. Siempre que el usuario desea, puede volver a redefinir los parámetros de la estimación y luego puede experimentar distintos modelos hasta que llegue a lo que se pueda considerar un buen resultado.

El mapa producido, solo presenta valores estimados en el área definida por las coordenadas X y Y máximas y mínimas del conjunto de puntos de monitoreo. Esto es así, porque son solamente los resultados interpolados (o sea, entre muestras).



En nuestro caso los puntos de agua subterránea, corresponden a pozos que se ubican en la cobertura sedimentaria correspondiente a la zona de llanura en el entorno del lago. Necesitamos entonces tener un mapa que permita calcular los índices de calidad en toda la zona de llanura.

Por eso se tiene que extender esta interpolación con la función “Extent” a toda la zona de llanura, luego se convierte esta interpolación a formato “raster” y se guarda.

Posteriormente se corta el área de la zona de llanura con la opción “Arctool box” / “Extract by Mask”, luego se reclasifica con la opción “Arctool box” / “Reclassify”.

CONCLUSIONES

Se aplicó la metodología del proyecto CAMINAR del Índice de Calidad del Agua, mostrando su sencillez y fácil aplicabilidad a una base de datos disponibles de un monitoreo químico.

El índice de calidad aplicado mostro que al espacializar los datos promedio de todas las campañas, la zona norte y noreste cercanas al lago Poopó al tener menor porcentaje de calidad, presentan menor calidad en sus aguas (Antequera, Poopó, Pazña), precisamente estas son las zonas donde mayor actividad minera se tiene. En la parte sur del lago Poopó se tiene igualmente baja calidad en las muestras analizadas.

La mejor calidad de las aguas luego de aplicar este índice de calidad y su posterior espacialización se presentó en Paria, Soracachi, Urmiri, Challapata, Huari, estas zonas son las que mayor actividad agrícola tienen.

La variación climática (periodo seco y húmedo) afecta a la calidad de las aguas en esta cuenca, el fenómeno detectado es el de disolución de minerales y sales del suelo por parte del agua subterránea y superficial.

En el periodo seco la calidad del agua es superior en la zona norte más alejada de la cuenca (Paria, Soracachi y Cayhuasi), en la zona noroeste (Tolaloma, Kulluri y Copacabanita) y la zona sureste (Huari, Challapata, Tacagua y Siquiri), todas estas zonas son agrícolas.

Al menos uno de los brazos del río Desaguadero influye sobre la calidad de las aguas de la región suroeste del lago Uru Uru en ambos periodos, el agua de este río estaría provocando que la calidad de las aguas en esta región disminuya.

Se conoce que existe una tendencia del flujo del agua subterránea de noreste a suroeste en esta cuenca [8]. Este dirección de flujo del agua subterránea, tendría un efecto negativo en la calidad del agua de la zona suroeste especialmente en el periodo húmedo, esto estaría provocando que la calidad de las aguas de esta región este disminuyendo.

La técnica de interpolación usada demostró su buena aplicación para la fácil visualización de la calidad del agua en toda la cuenca, a través de mapas que puedan ser interpretados con mucha sencillez por el público en general.

REFERENCIAS

1. ASDI/SAREC – UMSA
Informe Final Primera Fase 2000-2003 del proyecto “Manejo de recursos hídricos-hidroquímica de la cuenca de los lagos Poopó y Uru Uru. La Paz Bolivia, 2004.
2. CALIZAYA, A.
Hidrología y Recursos Hídricos en la cuenca de los lagos Poopó y Uru Uru (Instituto de Hidráulica e Hidrología, IHH). Memoria del Seminario Taller: “Intercambio de experiencias en la región de los lagos Poopó - Uru Uru y sus áreas de influencia” UMSA-ASDI/SAREC. Oruro - Bolivia. 2006.
3. FERNANDEZ, N., RAMIREZ, A. Y SOLANO, F.
A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators. Scielo Ing. Investig. vol.27 no.3, 2007.
4. GESTIÓN DE CUENCAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS CON INFLUENCIA MINERA – CAMINAR.
Cooperación Europea - Instituto de Investigaciones Químicas – UMSA.CAMINAR. La Paz-Bolivia. 2007-2009.
5. 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.



6. WP6 – IST – INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO CAMINAR.
Capacitación – Herramientas de soporte para la decisión, generación de mapas y uso herramientas de interpolación en ambiente SIG, Oruro - Bolivia, Abril 2010.
7. QUINTANILLA, J.
Sistema Hidrológico del Altiplano (A. H. S.) Cuenca del Río Desaguadero (Bol.) Tomo 1, Informe Final, La Paz Bolivia 1993. Universidad Mayor de San Andrés – Universidad Laval Québec –Canadá CIID – Canadá. Compilación de diferentes normas para evaluar la calidad del agua y adaptaciones, 2009.
8. QUINO, I.
Determinación de la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas en la región norte y este del lago Poopó. Tesis de Licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, Carrera de Ciencias Químicas, 2006.
9. Ley del Medio Ambiente, ley N° 1333 de 27 de abril de 1992. Reglamento a La Ley del Medio Ambiente, Decreto Supremo N° 24176 de 8 de diciembre de 1995.
10. DALENCE, S.
Compilación y traducción del texto guía: Hidroquímica, del Módulo X Calidad de Aguas, de la Maestría en Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra, Mención Recursos Hídricos, 2009. CLAS – ITC – UMSS Cochabamba – Bolivia. 2009.