

Evaluación de las aguas del río Rimac en Lima, Perú, utilizando el Índice de Calidad de Agua (ICA)

Patricia Bedregal^{1,*}, Pablo Mendoza¹, Marco Ubillus¹, Eduardo Montoya¹, Rosa Airas¹,
Luz Baca², Walter Fajardo²

¹ Instituto Peruano de Energía Nuclear, División de Técnicas Analíticas Nucleares, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

² Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), Área de Protección de los Recursos Hídricos, Calle Las Amapolas 350 Lima 14, Perú

Resumen

Se presentan y discuten los Índices de Calidad de Agua (ICA), obtenidos con los resultados del análisis de los parámetros físico-químicos: pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, fósforo total, nitrato y amonio; el parámetro microbiológico: coliformes fecales y el análisis de los metales: As, Cd, Cr, Cu, Mn y Pb en 09 estaciones de monitoreo de la Cuenca Alta del río Rímac (agosto-diciembre, 2009), caracterizada por la presencia de industria minera.

Abstract

The Water Quality Index (WQI) are presented and discussed. They has been obtained using the results of the physical-chemical parameters: pH, oxygen (dissolved), conductivity, biochemical oxygen demand, total suspended solids, total phosphorous, nitrate, ammonia; the microbiological parameter: fecal coliforms and the metal analysis of As, Cd, Cr, Cu, Mn and Pb in 09 monitoring sites of the river Rimac High Basin (August-December, 2009), characterized by mining industry exploitation.

1. Introducción

El río Rímac es uno de los ríos más importantes del Perú, principalmente porque abastece de agua y electricidad a Lima Metropolitana, donde se concentra más del 30% de la población del país. Tiene una longitud de 140 km, una cuenca de 3 312 km² y un caudal de 45 m³/s. Se divide en tres sectores [1]:

a) La Cuenca Alta (de los 5 200 a los 3 500 msnm), nace en la Laguna Ticticocha y es la parte colectora del agua, donde caen lluvias veraniegas, existen glaciares y lagunas que almacenan el agua y la dejan fluir durante el resto del año, cuando no llueve. En esta cuenca existe intensa actividad minera con explotación de cobre, plomo, zinc, antimonio, oro y plata. Están instaladas las empresas:

- Volcán Compañía Minera S.A.A. - Unidad Ticlio
- Empresa Minera Los Quenuales S.A. - Unidad Casapalca
- Compañía Minera Casapalca S.A.
- Perubar S.A. - Unidad Rosaura
- Compañía Minera San Juan (Perú) S.A.,

entre otras.

Un volumen significativo de vertimientos es evacuado directamente al río, provocando su contaminación.

b) La Cuenca Media (entre los 3 500 y los 1 000 msnm), donde el agua se aprovecha para la agricultura y para generar electricidad.

c) La Cuenca Baja (desde los 1 000 msnm hasta el nivel del mar), este sector es la parte ancha del valle, donde están ubicadas las ciudades de Lima y Callao.

En estas dos últimas cuencas se ubican 14 centrales hidroeléctricas así como fábricas de productos químicos, textiles, papeleras, alimentos, curtiembres, materiales de construcción, cerveza, etc.

El río Rímac pertenece a la vertiente del Pacífico, tiene como afluentes principales a la quebrada El Carmen y los ríos Chinchán, Blanco, Aruri, Santa Eulalia y Huaycoloro.

El río es un receptor de metales pesados provenientes de los desechos y relaves de las actividades mineras desarrolladas en la

* Correspondencia autor: pbedregal@ipen.gob.pe

cuenca alta, de las actividades industriales de la cuenca media y baja y de las aguas residuales domésticas, vertidas sin tratamiento y generadas por los centros poblados de Lima, Vitarte, Chaclacayo, Chosica y Matucana.

El Ministerio de Salud, a través de la Dirección General de Salud Ambiental, DIGESA, realiza el programa nacional de vigilancia y control de los recursos hídricos, con el monitoreo mensual, en 30 estaciones a lo largo de la cuenca (Figura 1), para determinar los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en cada estación [1].

Uno de los objetivos del proyecto Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y Tecnología Nucleares en América Latina y El Caribe, ARCAL, RLA 1/010, titulado “Mejora de la Gestión de las Masas de Agua que están Contaminadas con Metales”, en la que participan el IPEN y la

DIGESA, con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, es proponer los índices de calidad del agua, ICA, en los países de la región, como herramientas ideales para brindar un diagnóstico general sobre el estado del cuerpo de agua y facilitar la toma de decisiones, para actuar preventiva o correctivamente sobre ella [2].

En este reporte se presentan los índices de calidad de agua de 09 estaciones ubicadas en la Cuenca Alta del río, donde existe actividad minera. Estos índices han sido calculados a partir de los resultados de los parámetros físico-químicos y químicos, tales como: pH, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, turbidez, nitratos, coliformes fecales, plomo, manganeso, cadmio, cromo, cobre y arsénico, obtenidos en el monitoreo de agosto a diciembre del año 2009.

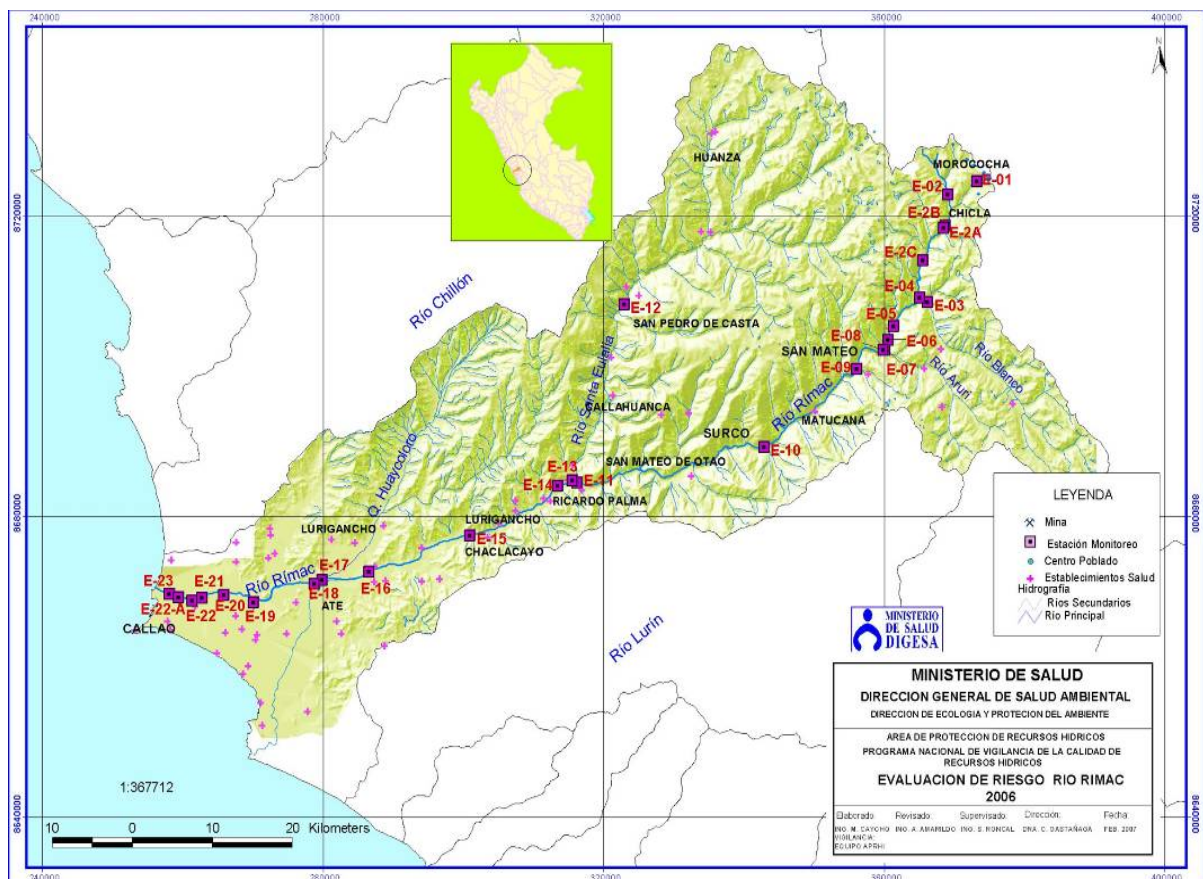


Figura 1. Mapa de la cuenca del río Rímac.

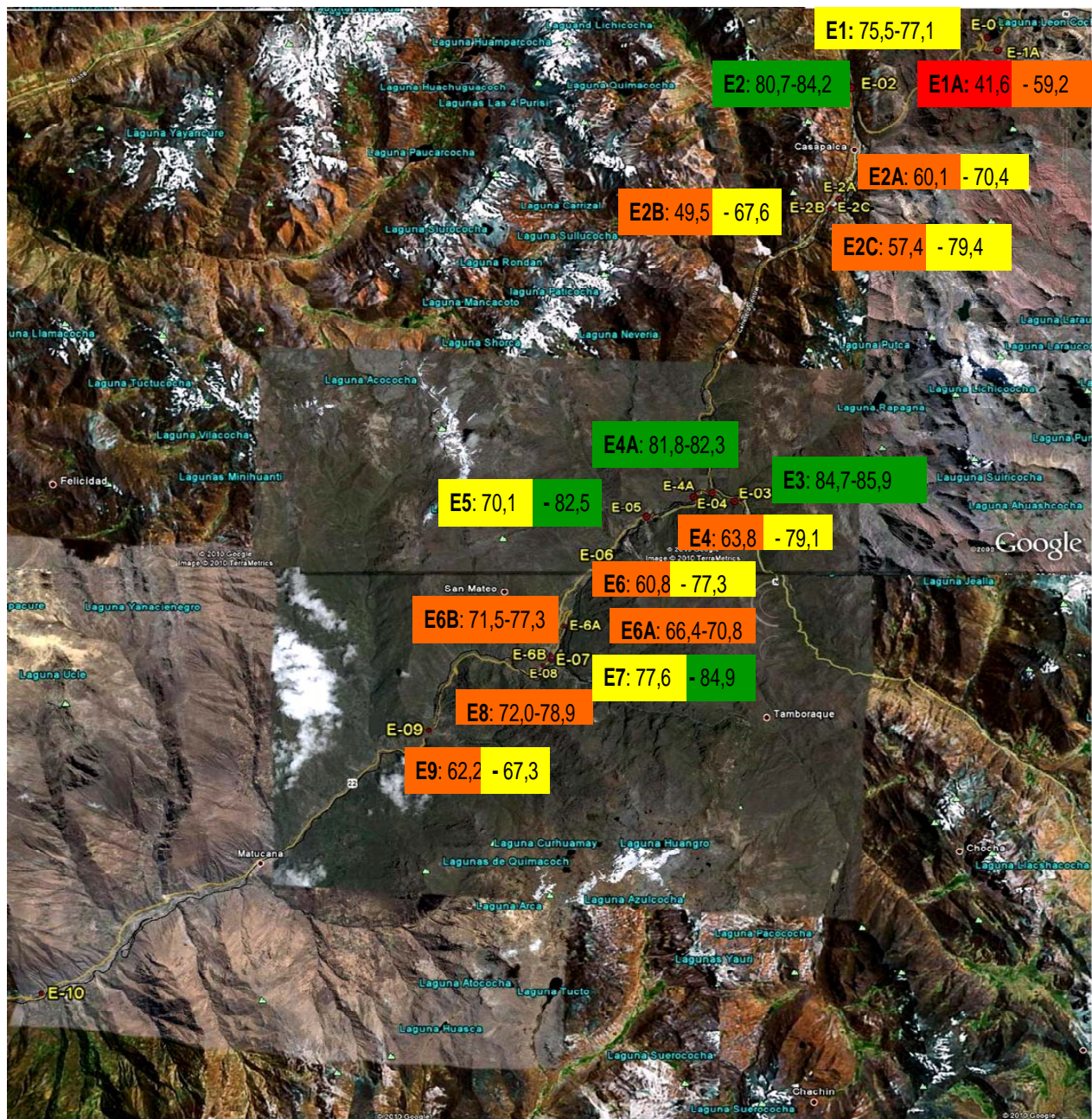


Figura 2. Vista aérea de las 09 estaciones de monitoreo de la Cuenca Alta del río Rímac (E01 – E09) y los valores de ICA máximos y mínimos obtenidos durante la campaña de muestreo.

2. Experimental

2.1. Estaciones de monitoreo y toma de muestra en la Cuenca Alta

Los índices de calidad, ICA, se han calculado para las estaciones de monitoreo indicadas en la tabla 1 y figura 2. Se han considerado los datos de los monitoreos de 09 estaciones de la cuenca Alta, obtenidos en 05 campañas de muestreo durante la temporada de invierno (01), primavera (03) y verano (01),

realizadas en el año 2009.

Los puntos de monitoreo E-1A, E-2A, E-2B, E-2C y E-06 están ubicados después de vertimientos de relaves de la Compañía Minera Volcán, Empresa Minera Los Quenuales, Compañía Minera Casapalca, Minera Perubar - Unidad Rosaura y Compañía Minera San Juan (Perú), respectivamente. Las estaciones E-02, E-03 y E-07 corresponden a estaciones ubicadas en ríos afluentes del río Rímac.

Tabla 1. Estaciones de Monitoreo de la Cuenca Alta.

Nº de estación	Estación de monitoreo
E-01	Bocatoma Laguna Ticticocha
E-1A	Quebrada Antaranra
E-02	Río Chinchán, puente Ferrocarril
E-2A	Río Rímac, 150 m aguas abajo del vertimiento 1
E-2B	Río Rímac, 200 m aguas abajo del vertimiento 2
E-2C	Río Rímac, 150 m aguas abajo del vertimiento 3
E-03	Río Blanco, estación meteorológica
E-04	Río Rímac, puente Anchi II
E-4A	Río Rímac, después de confluencia con río Blanco
E-05	Río Rímac, puente Pite
E-06	Río Rímac, puente Tamboraque III
E-6A	Río Rímac, central hidroeléctrica Huanchor
E-06B	Río Rímac, 100 m aguas abajo del vertimiento de la Minera San Juan
E-07	Río Aruri, 50 m antes de confluencia con río Rímac
E-08	Río Rímac, bocatoma, kilómetro 89 de carretera central
E-09	Río Rímac, kilómetro 83.5 de carretera central

Algunos parámetros han sido medidos directamente en campo, tales como: pH, demanda bioquímica de oxígeno, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, turbidez. Para el análisis de los otros parámetros se han tomado muestras en frascos de polietileno limpios (figura 3) y han sido transportados al laboratorio en cajas conservadoras a 4 °C de temperatura y preservados con ácido nítrico, para su tratamiento y análisis químico en el laboratorio.

2.2. Selección de los parámetros de medición

La DIGESA realiza sistemáticamente un monitoreo mensual a lo largo de la cuenca y el análisis de los siguientes parámetros: potencial de hidrógeno (pH), temperatura (T °C), conductividad eléctrica (CE), turbidez, nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total, coliformes totales, coliformes termotolerantes, fosfato (P_T), sulfato (SO_4^{2-}), sólidos suspendidos totales (SST), carbono orgánico total (COT), cianuro (CN^-), cloruro (Cl^-), As, Al, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb y Zn.

En el marco del proyecto y por consenso entre los países de la región de América Latina y el Caribe [2], se consideraron los siguientes parámetros básicos para la determinación del ICA: pH, oxígeno disuelto (OD), CE, DBO_5 , coliformes fecales, SST, P_T , N-NO_3 y N-NH_4 y los metales As, Hg, Cd, Cr, Cu y Pb. Sin embargo, en este reporte no se han utilizado los parámetros OD y Hg, debido a que no han sido determinados. Se ha incluido manganeso en la evaluación. Como valor del nitrógeno amoniacal (N-NH_4), se ha tomado el de nitrógeno total Kjeldahl (NTK), que considera el nitrógeno orgánico y el amoniacal.

Los metales han sido determinados por espectrometría de absorción atómica de acuerdo con métodos estándar establecidos [3].

2.3. Cálculo del Índice de Calidad de Agua [4,5]

El índice de calidad de agua se basa en la fórmula desarrollada por la British Columbia Ministry of Environment, que fue adoptada por el Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME.

**Figura 3.** Monitoreo en el río Rímac, Cuenca Alta.

El índice de calidad de agua es obtenido matemáticamente, combinando tres factores: el *objetivo* (F_1), la *frecuencia* (F_2) y la *amplitud* (F_3). El *objetivo*, representa el porcentaje de variables que no cumplen sus objetivos, al menos una vez, durante el tiempo bajo consideración con relación al número total de variables medidas. La *frecuencia*, representa el porcentaje de los ensayos individuales que no cumplieron el objetivo. La *amplitud*, representa la cantidad de pruebas que no cumplieron los objetivos y es una función asintótica que escala la suma normalizada de las excursiones respecto de

los objetivos en el intervalo 0 y 100.

A su vez, la *amplitud* F_3 , se calcula tomando en cuenta: i) el número de veces en las que una concentración individual es mayor que el objetivo y es llamado “*excursión*”; ii) la cantidad colectiva por la cual, los ensayos individuales están fuera de conformidad, denominada por la *suma normalizada de excursiones* (*nse*). El índice de calidad de agua se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CCMEWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

El divisor 1.732 normaliza el resultado entre un rango entre 0 y 100, donde 0 representa la peor calidad de agua y 100 representa la mejor calidad de agua.

Para la aplicación del cálculo de la ecuación del índice de calidad de agua se ha utilizado un programa elaborado en macros de Excel [6].

3. Resultados y Discusión

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos en el cálculo de los índices de calidad de agua en cada una de las estaciones y campañas de muestreo. Las estaciones de monitoreo: E-1, E-4, E-6A, E-6B, E-8 y E-9 en las 05 campañas, así como las estaciones E-2A, E-2B en las campañas de verano y E-2C en la campaña de invierno y verano, dan resultados de índices de calidad de agua entre 65 y 79, es decir la calidad del agua es de categoría *regular*, lo que significa que está siendo esporádicamente amenazada. Las condiciones de agua natural están, en algunas ocasiones, fuera de los niveles de calidad deseados.

Las estaciones de monitoreo E-1A y E-2B en todas las campañas, así como las estaciones E-2A y E-2 C en las campañas de invierno y primavera, dan como resultado valores de índices de calidad de agua entre 45 y 64, que corresponde a la categoría de calidad de agua *marginal*, es decir que la calidad del agua está siendo frecuentemente amenazada, quedando fuera de los niveles de calidad deseados.

Un valor de índice de calidad menor a 44, calificado como *pobre*, se ha obtenido en la estación de monitoreo E-1A en la campaña de verano, lo que significa que en ese período de

tiempo la calidad del agua del río Rímac ha sido amenazada continuamente y varios parámetros de medición estuvieron fuera de los niveles de calidad deseados.

Las estaciones de monitoreo E-02, E-03, E-05 –en la campaña de invierno– E-07 –en la de verano– y E-4A dan valores de índices de calidad entre 80 y 94, con un valor mínimo de 80.7 y un valor máximo de 85.9, lo que indica una categoría de calidad de agua, *bueno*, es decir la calidad está siendo protegida y el cuerpo de agua presenta menor grado de amenaza. Estas estaciones están ubicadas en ríos afluentes del río Rímac. La estación E-02 en el río Chinchán, la E-03 en río Blanco, E-4A después de confluencia con el río Blanco y E-07 en el río Aruri, antes de confluir con el río Rímac.

Por otro lado, la evaluación de los resultados de los monitoreos realizada por la DIGESA, utiliza los valores límites establecidos en la Resolución de Jefatura, RJ: N° 0291-2009-ANA, para agua Clase II, y los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua que considera “aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional”, aprobado mediante D.S. N° 002-2008-MINAM del 31 de julio de 2008.

Los valores de pH encontrados cumplen con los ECA de agua entre 5.5 – 9.0. Los valores más altos, de 8.82 y 8.81, se han obtenido en la estación E-01. Los valores más bajos de 6.58 se han obtenido en la estación E-1A y E-2B, puntos de monitoreo ubicados después de la descarga de la Minera Volcán y Los Quenuales, respectivamente.

El valor ECA para la conductividad eléctrica es de 1600 $\mu\text{S} / \text{cm}$. En el tramo de río estudiado, el resultado supera el límite. Sin embargo, se han obtenido resultados más altos en las estaciones E-1A y E-2A de 1371 $\mu\text{S} / \text{cm}$ y 1238 $\mu\text{S} / \text{cm}$, respectivamente, en el monitoreo del mes de setiembre.

El ECA para la turbidez es de 100 unidades nefelométricas (UNT). El punto de monitoreo E-1A da el resultado más alto: 846 UNT, esta estación está ubicada después de la descarga de la Minera Volcán. De igual manera, se observa que las estaciones de monitoreo E-2A, E-2B, E-2C, ubicadas después de vertimientos mineros, presentan valores de turbidez, sólidos suspendidos totales (SST) y

DBO₅ más altos, durante todo el período de muestreo. Siendo 5 mg/L el valor límite considerado para DBO₅.

Para Fósforo total no existe valor de regulación; sin embargo, tomando en consideración el valor de la bibliografía de 0.2 partes por millón, las estaciones de monitoreo E-06 y E-6A, presentan los resultados más altos. Estas estaciones están ubicadas aguas abajo de la minera San Juan.

El ECA para nitratos es de 10 mg/L. Valores muy por encima del límite se han obtenido en las estaciones: E-1A, 51.1 mg/L en el monitoreo del mes de setiembre; E.2A, 16 mg/L en el monitoreo del mes de octubre; E-2A, 12.56 mg/L y E-2B, 16.74 mg/L en el monitoreo del mes de noviembre.

Los valores límite establecidos para As, Cd, Cr, Cu, Mn y Pb son: 0.10 mg/L, 0.01 mg/L, 0.05 mg/L, 1.0 mg/L, 0.4 mg/L y 0.05 mg/L,

respectivamente. Resultados por encima del valor límite se han obtenido en el muestreo del mes de agosto, para Mn y Pb en las estaciones de monitoreo E-1A, E-2A, E-2B, E-2C con un valor máximo de 1.96 mg/L para Mn y 1.0 mg/L para Pb en la estación E-2B. Estas estaciones están ubicadas después de las descargas de las empresas mineras de la Cuenca Alta. En el monitoreo de los meses de setiembre y octubre también se han obtenido valores por encima del límite para Mn, en las estaciones E-1A de 18.25 mg/L, en el mes de setiembre y 15.89 mg/L en el mes de octubre en la estación E-2A.

En el monitoreo del mes de diciembre se han obtenido valores mayores al límite para As, Cd, Cu, Mn y Pb en la estación E-1A. El valor de 36.45 mg/L para Mn ha sido el más alto de la temporada de muestreo.

Tabla 2. Resultados Índices de Calidad de Agua en la cuenca alta del río Rímac
(Verde=buena, amarillo= regular, naranja=marginal, rojo = pobre).

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	Período	F ₁	F ₂	F ₃	CCME WQI
E-1 Bocatoma Laguna Ticticocha	Invierno	15.4	15.4	33.1	77.1
E-1 Bocatoma Laguna Ticticocha	Primavera	15.4	16.7	35.8	75.5
E-1 Bocatoma Laguna Ticticocha	Verano	15.4	15.4	33.1	77.1
E-1A Quebrada del efluente Volcán	Invierno	30.8	30.8	62.5	56.0
E-1A Quebrada del efluente Volcán	Primavera	38.5	27.8	52.4	59.2
E-1A Quebrada del efluente Volcán	Verano	41.7	41.7	82.2	41.6
E-2 Río Chiinchan Puente Ferrocarril km 119.5	Invierno	15.4	15.4	24.4	81.1
E-2 Río Chiinchan Puente Ferrocarril km 119.5	Primavera	15.4	16.2	24.9	80.7
E-2 Río Chiinchan Puente Ferrocarril km 119.5	Verano	15.4	15.4	16.7	84.2
E2A Los Quenuales	Invierno	23.1	23.1	52.5	64.3
E2A Los Quenuales	Primavera	30.8	29.7	54.3	60.1
E2A Los Quenuales	Verano	30.8	30.8	27.2	70.4
E2B Cia. Min. Casapalca	Invierno	30.8	30.8	75.8	49.5
E2B Cia. Min. Casapalca	Primavera	30.8	31.6	55.4	59.1
E2B Cia. Min. Casapalca	Verano	30.8	30.8	35.3	67.6
E2C Minera Perubar-Rosaura	Invierno	23.1	23.1	44.5	68.1
E2C Minera Perubar-Rosaura	Primavera	38.5	33.3	53.5	57.4
E2C Minera Perubar-Rosaura	Verano	15.4	15.4	28.3	79.4
E3-Estacion Senamhi km 101 CC	Invierno	15.4	15.4	12.4	85.5
E3-Estacion Senamhi km 101 CC	Primavera	15.4	17.1	13.0	84.7
E3-Estacion Senamhi km 101 CC	Verano	15.4	15.4	11.2	85.9
E-4 Puente Anchi II km 100 CC	Invierno	23.1	23.1	46.4	67.2
E-4 Puente Anchi II km 100 CC	Primavera	30.8	28.9	46.4	63.8
E-4 Puente Anchi II km 100 CC	Verano	15.4	15.4	29.0	79.1
E-4A Río Rímac después de confluencia río Blanco	Invierno	15.4	15.4	22.3	82.0
E-4A Río Rímac después de confluencia río Blanco	Primavera	15.4	15.8	22.6	81.8

E-4A Río Rímac después de confluencia río Blanco	Verano	15.4	15.4	21.5	82.3
E-5 Puente Pite km 95 CC	Invierno	15.4	15.4	21.1	82.5
E-5 Puente Pite km 95 CC	Primavera	23.1	21.6	41.0	70.1
E-5 Puente Pite km 95 CC	Verano	23.1	23.1	33.1	73.2
E-6 Puente Tamboraque III	Invierno	15.4	15.4	48.1	69.5
E-6 Puente Tamboraque III	Primavera	38.5	34.2	44.3	60.8
E-6 Puente Tamboraque III	Verano	15.4	15.4	32.8	77.3
E-6A Central hidroeléctrica Huanchor	Invierno	30.8	30.8	38.8	66.4
E-6A Central hidroeléctrica Huanchor	Primavera	23.1	18.4	39.7	71.4
E-6A Central hidroeléctrica Huanchor	Verano	23.1	23.1	38.7	70.8
E-6B, Minera San Juan	Invierno	15.4	15.4	39.8	73.8
E-6B, Minera San Juan	Primavera	23.1	18.4	39.6	71.5
E-6B, Minera San Juan	Verano	15.4	15.4	32.8	77.3
E-7 50m Antes de Aruri-Rímac	Invierno	15.4	15.4	28.0	79.5
E-7 50m Antes de Aruri-Rímac	Primavera	23.1	19.4	24.4	77.6
E-7 50m Antes de Aruri-Rímac	Verano	16.7	16.7	11.4	84.9
E8- Toma Tamboraque km 89 CC	Invierno	15.4	15.4	39.6	73.9
E8- Toma Tamboraque km 89 CC	Primavera	23.1	18.4	38.5	72.0
E8- Toma Tamboraque km 89 CC	Verano	15.4	15.4	29.5	78.9
E9- Puente Tambo de Viso	Invierno	23.1	23.1	46.3	67.3
E9- Puente Tambo de Viso	Primavera	30.8	25.0	43.2	66.1
E9- Puente Tambo de Viso	Verano	23.1	23.1	56.7	62.2

4. Conclusiones

a) La calidad del agua del río Rímac en la Cuenca Alta está siendo impactada por las actividades mineras desarrolladas en la zona, sobre todo en el tramo comprendido entre las estaciones de monitoreo E-1A, E-2A, E-2B y E-2C, donde la calidad del agua no está dentro de los niveles óptimos.

b) La evaluación efectuada con los valores ICA coincide con la realizada por DIGESA, que utiliza los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) e identifica diferencias entre los puntos de monitoreo, respecto a la calidad del agua.

c) El uso del ICA para la evaluación de la calidad de cursos de agua superficial ha probado ser una herramienta útil, aplicable a un gran número de datos.

5. Agradecimientos

Los participantes en el proyecto agradecen al Organismo Internacional de Energía Atómica, por la ayuda financiera brindada en el marco del proyecto ARCAL 1/010, "Mejora de la gestión regional de las masas de agua que están contaminadas con metales" y a la Dirección General de Salud Ambiental

(DIGESA) por su participación y aportes en la ejecución de este estudio.

6. Referencias

- [1] Dirección General de Salud Ambiental. DIGESA. [homepage de Internet]. Disponible en: <http://www.digesa.minsa.gob.pe>.
- [2] Organismo Internacional de Energía Atómica. Informe Final sobre Propuesta de un Índice de Calidad de Aguas para la Región de América Latina y el Caribe. Proyecto ARCAL 1/010. Noviembre 2008.
- [3] Eaton AD, Clesceri LS, *et al.* editors. Standard methods for the examination of water & wastewater. 21st. ed.; 2005.
- [4] Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. CCME Water Quality Index 1.0, User's Manual. 2001.
- [5] Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, 2001. Technical Report.
- [6] Programa WQI Calculator 1.0. Macros Excel para cálculo de valores de ICA. Distribución en el marco del proyecto a los países participantes. [Informe Interno].