



FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

CIENCIA Y TECNOLOGÍA

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN - FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA - UMSS

Número 14 - 2022



Cochabamba - Bolivia

Universidad Mayor de San Simón
Facultad de Ciencias y Tecnología
Instituto de Investigación

Revista Ciencia y Tecnología, Número 14, Año 2022
de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor
de San Simón.

La Revista Ciencia y Tecnología es una publicación que busca incentivar el diálogo entre la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón y los sectores de la sociedad involucrados en aspectos de desarrollo científico y tecnológico.

Autoridades facultativas:

Ing. Juan Terrazas Lobo

Decano

Dr. Lucio Alejo Espinoza

Director Académico

Dr. Daniel Guzmán Duchén

Director Instituto de Investigación

Diseño de portada:

M.Sc. Aidee Vargas Colque

Lic. Daniela Andrea Mareño Rocha

Fotografías de portada y contraportada:

Centro de Alimentos y Productos Naturales

Portada: Personal realizando trabajo de laboratorio: análisis de proteínas (izq.), análisis de viscoelasticidad por reometría (der.)

Contraportada: Personal y equipos de trabajo.

Contactos:

Calle Sucre frente Parque La Torre

Teléfono: 4231765

Fax: 591-4541781

Correo: iicyt@fcyt.umss.edu.bo

Los artículos de la presente revista son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Queda prohibida cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra que no cuente previamente con autorización de los titulares de propiedad intelectual.



Revista

**CIENCIA Y
TECNOLOGÍA**

Nº 14

Presentación

Comité Editorial

Dr. Daniel Guzmán Duchén (Coordinador)

Dr. Wilson Aguilar Mamani

Dr. Luis Aguirre Urioste

Ing. MBA Boris Alfaro Bazán

M.Sc. Henry Antezana Fernández

M.Sc. Raquel Antezana Gómez

M.Sc. Omar Arce García

Ing. Jaime Ayllón Acosta

Mgr. Boris Camacho Peña

Dra. Melina Campero Paz

Dra. Vanesa Castro Alba

Dr. Edwin Escalera Mejía

Dra. Carla Eloisa Fernández Espinoza

Dr. Edgar Esteban Gareca León

Dr. Hector Guzmán Suárez

Dra. Adelina Herbas Angulo

M.Sc. Sarvia Jahel Ledezma Pérez

Dra. Eliana Maldonado Gutiérrez

M.Sc. Yony Richard Montoya Burgos

M.Sc. Freddy Navarro Antezana

Dra. Daysi del Rosario Pérez Rea

Dr. Danny Rejas Alurralde

Dra. Cinthia Carola Rojas Arnez

M.Sc. Ana María Romero Jaldín

Dr. Jerry Solís Valdivia

Dr. Juan Carlos Terrazas Vargas

La investigación es uno de los pilares fundamentales en la Universidad Mayor de San Simón, a través de ella, se busca obtener nuevos conocimientos y ampliar los ya adquiridos con el fin de aplicarlos en la resolución de problemáticas locales, nacionales e internacionales.

La Facultad de Ciencias y Tecnología ha realizado aportes muy importantes en el área de la investigación a más de cuatro décadas de su creación. Esto se ve reflejado al ser la facultad con más centros y programas dedicados a la investigación, contando con personal especializado en el área. La difusión y publicación de los resultados logrados tanto a la comunidad científica como a la población en general es el punto culmine de esta actividad.

Es en ese sentido que todo el personal de la facultad se debe sentir orgulloso de contar con un instrumento dedicado a la difusión de resultados, la Revista “Ciencia y Tecnología”. La presente entrega corresponde al décimo cuarto número, fruto del esfuerzo de toda la comunidad universitaria.

Convencido de que podemos llegar mucho más lejos como facultad, el reto a corto plazo es poder indexar nuestra revista y así ser reconocidos en el ámbito internacional. Este trabajo no podrá ser realizado sin el apoyo de Autoridades, Comité Editorial, Docentes, Docentes a Dedicación Exclusiva, Investigadores, Administrativos y Estudiantes. Sé que será un esfuerzo muy grande pero juntos podemos seguir construyendo la facultad que todos queremos.

Edición y diseño

M.Sc. Aidee Vargas Colque

Dr. Daniel Guzmán Duchén

Coordinador Comité Editorial

ÍNDICE

Artículos Científicos

Dinámica estacional de la limitación de nutrientes en la laguna Alalay Danny Rejas, Carla E. Fernández	9
Dosificación experimental a nivel de laboratorio en hormigones lateríticos con el método IBRACON IPT Romina Méndez, Boris Camacho	16
Efecto del empaquetamiento del agregado mediante la aplicación del método Bailey en el desempeño a deformación permanente de mezclas asfálticas Edgar J. Ibañez, Jahel S. Ledezma	27
Estructura del ensamblaje de microcrustáceos en tres distritos biogeográficos de los Andes de Bolivia Francisca Acosta, Ximena Aguilera, Melina Campero, Pablo Prado, Carla E. Fernández	35
Evaluación de la estabilidad de los productos usados para la cloración del agua como método de desinfección en la EPSA AUAP de la población de El Paso, Cochabamba Rodrigo Mejía, Alvaro R. Mercado	46
Evaluación reológica del asfalto modificado con grano de caucho reciclado por vía húmeda respecto a su desempeño a temperaturas altas Jahel S. Ledezma	53
Fitorremediación de suelos contaminados por cadmio y plomo mediante plantas florales plantadas en terreno agrícola en ensayos con medios salinos Erick Ferrufino-Guardia, Christian Estívariz, M. Micaela Guamán	61
Red interconectada de áreas verdes para el mejoramiento ambiental del municipio de Cochabamba, Bolivia Carmen Cruz, Paola G. Cruz, Pablo E. Prado, Marko Quiroga, Luis F. Aguirre	67





Artículos Científicos

Dinámica estacional de la limitación de nutrientes en la laguna Alalay

Danny Rejas^{1,*}, Carla E. Fernández¹

¹Unidad de Limnología Recursos Acuáticos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*danny.rejas@gmail.com

Resumen

Con el fin de proporcionar información útil para la gestión y restauración de la laguna Alalay, nos propusimos determinar la dinámica estacional de la limitación de nutrientes para el crecimiento fitoplanctónico. Realizamos 12 ensayos con adiciones selectivas de nitrógeno (N) y fósforo (P) entre febrero de 2019 y noviembre de 2020. Durante la mayor parte del período de estudio observamos que el N fue el principal nutriente limitante, lo que es consistente con lo encontrado en otros cuerpos de agua eutróficos o hipereutróficos como la laguna Alalay. Al final de período de estudio (septiembre y noviembre de 2020) el P limitó el crecimiento fitoplanctónico. Para entender el mecanismo que ocasiona este cambio es necesario estudiar la composición de ensamblaje fitoplanctónico y la relación N:P de la carga de nutrientes.

Palabras clave: *Fitoplancton, Nitrógeno, Fósforo, Tasa de crecimiento.*

Abstract

In order to provide useful information for the management and restoration of laguna Alalay, we set out to determine the seasonal dynamics of nutrient limitation for phytoplankton growth. We conducted 12 trials with selective additions of nitrogen (N) and phosphorous (P) between February 2019 and November 2020. During most of the study period, we observed that N was the main limiting nutrient, which is consistent with findings in other eutrophic or hypereutrophic water bodies. At the end of the study period (September and November 2020), P limited phytoplankton growth. To understand the mechanism that causes this change, it is necessary to study the composition of the phytoplankton assemblage and the N:P ratio of the nutrient load.

Key words: *Phytoplankton, Nitrogen, Phosphorus, Growth rate.*

1. Introducción

La eutrofización es un proceso ecológico natural de envejecimiento de los cuerpos de agua, en el cual la producción de materia orgánica se va incrementando lentamente debido al enriquecimiento con nutrientes (Bhagowati & Ahamad, 2019). Este proceso puede ser fuertemente acelerado por la actividad humana como resultado de los vertidos agrícolas, urbanos e industriales (Moss, Madgwick, & Phillips, 1997), cuando esto sucede nos referimos al proceso como eutrofización antropogénica (Le Moal et al., 2019), la cual ocurre en una escala de tiempo mucho menor, y tiene por lo tanto efectos ecológicos y sociales que preocupan a la sociedad (Le Moal et al., 2019).

La eutrofización antropogénica es una amenaza para ecosistemas lacustres a nivel global, la excesiva

descarga de fósforo (P) y nitrógeno (N) conduce a una elevada productividad primaria (Van der Does et al., 1992), acumulación de grandes cantidades de materia orgánica cuya descomposición bacteriana ocasiona el descenso de los niveles de oxígeno y puede causar mortandades masivas de peces (Scheffer, 1998). Otras consecuencias de la eutrofización pueden ser descenso de la biodiversidad, explosiones de fitoplancton (especialmente cianobacterias) que vuelven el agua turbia, le dan mal olor, sabor y provocan la pérdida de vegetación litoral (Gulati & van Donk, 2002; Scheffer, Houser, Meijer, Moss, & Jeppesen, 1993).

Durante las últimas décadas este proceso ha sido muy estudiado, actualmente existe una amplia gama de herramientas de restauración de la calidad de aguas y ecosistemas que varían desde medidas externas para reducir la entrada de nutrientes, hasta medidas

internas diseñadas para retener los nutrientes en los sedimentos o extraerlos de los ecosistemas (Jilbert, Couture, Huser, & Salonen, 2020). La mayoría de estas medidas se enfocan en elementos específicos (N, P o ambos) y la selección más adecuada debe basarse en un entendimiento científico de los procesos que ocurren en los cuerpos de agua y su respuesta a las acciones de restauración. En este sentido, determinar la identidad del nutriente que limita la producción primaria y las variaciones estacionales de la misma se convierte en un insumo indispensable para predecir y mitigar los efectos de la descarga antropogénica de nutrientes (Elser et al., 2007).

La laguna Alalay ha sufrido un acelerado proceso de eutrofización antrópica a partir de la década de 1980 y se han desarrollado acciones de restauración con poco éxito a partir de la década de 1990 (Ayala, Acosta, Mooij, Rejas, & Van Damme, 2007). Para encarar futuras acciones de restauración será necesario un profundo conocimiento del funcionamiento del ecosistema, siendo la limitación del crecimiento algal uno de los importantes procesos a tomar en cuenta. Por lo anteriormente mencionado realizamos este estudio con el objetivo de determinar la dinámica estacional de la limitación de nutrientes inorgánicos para el desarrollo fitoplanctónico en la Laguna Alalay.

2. Métodos

La laguna Alalay está ubicada al sudeste de la ciudad de Cochabamba (Bolivia; 17°23'43" Sur y 66°09'35" Oeste; Fig. 1), a 2.558 m.s.n.m. Su superficie varía entre 2 y 2,3 Km², con un perímetro aproximado de 8.121 m y un volumen máximo de agua cercano a 3.000.000 m³. Fue construida con la finalidad de regular las crecidas del río Rocha, sin embargo, en la actualidad el objetivo de las autoridades locales es recuperar este sistema para fines de recreación y conservación. La Laguna Alalay forma parte del sistema hídrico del Valle Central de Cochabamba y pertenece a las cuencas del río Rocha - Maylanco y Santiviáñez, ambas integran el sistema de Cuencas del río Caine - Grande. Se encuentra emplazada en un área de formación geológica post-glacial, conformada por una depresión con suelos residuales en su sector medio, compuesta por suelos coluviales y escombros de roca en sus laderas y macizos rocosos en los costados este y oeste (Figura 1).

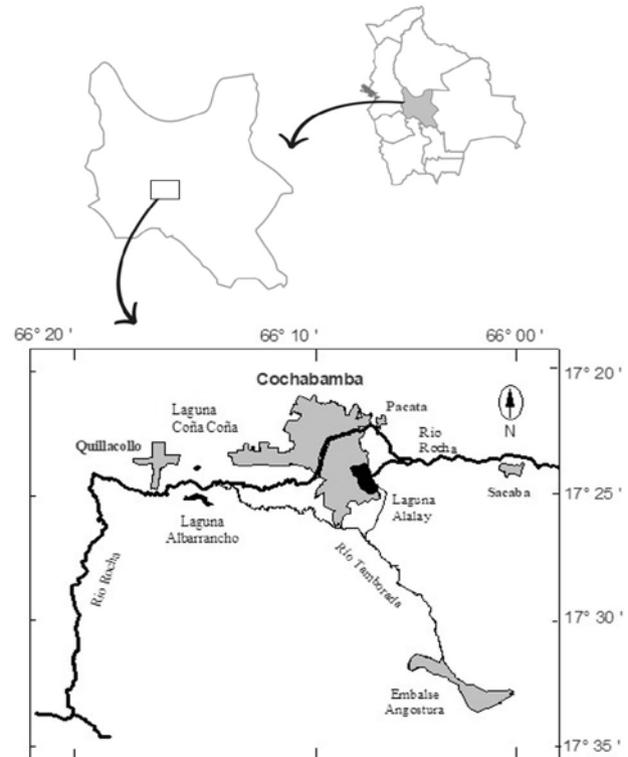


Figura 1. Localización de la Laguna Alalay en Bolivia y Cochabamba, mostrando parte de la cuenca del Río Rocha.

El clima es tropical semiárido, caracterizado por dos épocas bien definidas; una época seca (entre mayo y octubre) y otra lluviosa (entre noviembre y abril). La precipitación promedio anual es de 450 mm y la temperatura media anual es de 18 ° C. Sus afluentes son: i) el río Rocha, cuyas aguas en época de lluvias están desviados por el túnel del Abra; ii) la represa Angostura (principalmente durante la época seca); y iii) las aguas de escorrentía de una serie de canales pluviales (activos e inactivos) construidos para el drenaje de aguas de lluvia de la zona colindante.

Realizamos 12 ensayos entre febrero de 2019 y noviembre de 2020 para determinar las variaciones temporales de la respuesta de las tasas de crecimiento fitoplanctónico a las adiciones de N y P. No realizamos ensayos en noviembre de 2019 (debido a problemas de orden civil) y durante el año 2020 sólo llevamos a cabo 3 ensayos debido a la pandemia de COVID-19. Durante el período de estudio medimos en campo o tomamos muestras para medir algunas variables ambientales: profundidad, transparencia, oxígeno disuelto, pH, temperatura, conductividad, sólidos totales, sólidos suspendidos y concentración de clorofila-*a*.

Cada ensayo se llevó a cabo con un diseño factorial completo de adición de nutrientes, con cuatro tratamientos: 1) adición de nitrógeno y fósforo (NP), 2) adición de fósforo (P), 3) adición de nitrógeno (N), y 4) un tratamiento de control. Cada tratamiento contó con 3 repeticiones, haciendo un total de 12 unidades experimentales.

Tomamos agua de la zona pelágica de la laguna Alalay con un cilindro muestreador que permite extraer una muestra integrada de toda la columna de agua. Tamizamos el agua a través de una malla Nitex de 200 μm para eliminar el meso y macrozooplancton y la trasladamos inmediatamente al laboratorio de la ULRA-UMSS. Para los ensayos utilizamos botellas de policarbonato de 300 ml que recibieron N (como NH_4Cl) y/o P (como KH_2PO_4), incrementando las concentraciones naturales en 140 μM de N y en 28 μM de P. Las botellas de control no recibieron adiciones de N o P. Una vez aplicados los nutrientes las botellas fueron llenadas con el agua tomada de la laguna, misma que contenía las concentraciones de algas y nutrientes presentes en la laguna, pero de la cual los depredadores habían sido excluidos mediante el tamizado. Incubamos las botellas bajo luz artificial en laboratorio por 24 – 48 h.

Determinamos la concentración de clorofila-*a* (*Chl-a*) al inicio y final de los ensayos mediante mediciones de clorofila *in vivo* con un fluorómetro (Aquafluor

fluorometer, Turner Designs). Para transformar estas lecturas de clorofila *in vivo* en concentraciones de *Chl-a*, cuantificamos la concentración de *Chl-a* en un subconjunto de 10 muestras mediante filtración de 150 – 200 ml de agua de la laguna a través de filtros GF/F, extracción con etanol y lectura en fluorómetro previamente calibrado con soluciones estándar de *Chl-a*. Construimos una curva de calibración mediante un análisis de regresión relacionando las lecturas de clorofila *in vivo* con la concentración de *Chl-a* (Rejas & Muylaert, 2010).

Calculamos las tasas de crecimiento fitoplanctónico diarias (μ) mediante la fórmula: $\mu = \text{Ln}(Chl_t / Chl_0) / t$, donde Chl_0 y Chl_t son concentración de *Chl-a* inicial y final, respectivamente, y t el tiempo de incubación en días (Galford & Sterner, 2000). Comparamos las medias de las tasas de crecimiento entre tratamientos mediante análisis de varianza (ANOVA). Cuando las diferencias fueron estadísticamente significativas empleamos el test post-hoc de Tukey para determinar qué tratamientos presentaban diferencias. Realizamos los análisis estadísticos con el programa R v4.1.2 (R Core Team, 2021).

3. Resultados

La profundidad de la laguna varió entre 72 y 220 cm, la menor profundidad fue registrada en septiembre de 2020 (72 - 150 cm) mientras que la mayor profundidad

Tabla 1

*Parámetros fisicoquímicos del agua (Prof. = profundidad; Trans. = transparencia, OD = Oxígeno disuelto, T = temperatura, Cond. = conductividad, ST = sólidos totales, y SS = Sólidos suspendidos) y concentración de clorofila-a (Chl-a) en la laguna Alalay durante el periodo de estudio. *La fecha de toma de medición de los parámetros fisicoquímicos no coincide con el inicio del ensayo.*

Fecha	Prof. (cm)	Transp. (cm)	OD (mg l^{-1})	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)	Cond. ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	ST (mg l^{-1})	SS (mg l^{-1})	Chl-a ($\mu\text{g l}^{-1}$)
05/02/2019	130-185	5,5-16,2	2,1-2,9	9,0-9,1	18,4-19,2	1390-2330	1240-1781	89-213	1037
25/02/2019	120-200	13,0-14,0	1,7-3,5	9,0-9,1	20,7-22,1	2160-2170	1519-1545	57-68	816
14/03/2019*	165-220	14,5-16,5	2,1-4,1	9,0-9,8	19,8-23,7	2050-2900	1511-1528	50-61	1249
20/05/2019	145-180	7,5-12,5	6,4-6,7	9,1-9,2	14,7-16,7	2240-2340	1805-1872	112-158	1535
16/07/2019	105-160	13,0-18,0	3,6-6,5	9,2-9,3	13,1-14,6	2360-2410	1880-1996	147-190	918
13/08/2019	102-152	12,5-16,0	6,3-7,9	9,3-9,3	16,3-18,6	2380-2610	2004-2072	105-129	1299
17/09/2019	100-140	11,5-14,5	5,8-7,2	9,3-9,4	15,3-15,5	2710-2840	2162-2207	112-127	1295
15/10/2019	80-150	11,0-14,0	4,7-11,6	8,9-9,3	16,5-22,0	3180-3530	2433-2505	102-148	1103
10/12/2019	107-182	10-12,75	1,1-2,0	9,5-9,5	19,4-20,4	3186-3790	2937-2968	180-190	1530
18/02/2020	72-150	14,0-18,0	1,5-1,7	9,7-9,7	21,3-22,2	3400-3430	2614-2666	168-183	1026
29/09/2020	80-110	9,5-12,5	2,4-2,5	9,5-9,6	15,6-21,8	4720-4730	3973-4353	401-426	1919
05/11/2020	80	5,5-6,0	2,5-3,5	9,6-9,7	14,2-23,5	2200-6480	5144-6573	679-1373	2163

se observó en marzo de 2019 con 165-220 cm. La transparencia del agua fue extremadamente baja durante todo el periodo de estudio, variando entre 5 y 18 cm. El oxígeno disuelto mostró valores por debajo de 3 mg l⁻¹, excepto entre mayo y septiembre de 2019 cuando se observó valores ligeramente superiores, en coincidencia con temperaturas bajas. Los valores de sólidos totales (1240 – 6573 mg l⁻¹), sólidos suspendidos (50 -1373 mg l⁻¹) y clorofila (816 – 2163 µg l⁻¹) fueron extremadamente altos durante todo el período de estudio, pero alcanzaron los valores máximos en septiembre y noviembre de 2020, al final del período de estudio (Tabla 1).

Encontramos efectos significativos de la adición de nutrientes en ocho de los doce ensayos realizados.

El N incrementó significativamente de las tasas de crecimiento fitoplanctónico en los ensayos desde febrero hasta agosto de 2019 (valores de p < 0,05). En los ensayos realizados entre septiembre y diciembre de 2019 (17SEP19, 15OCT19 y 10DIC19) las diferencias no fueron estadísticamente significativas (p > 0,05), sin embargo, también observamos una tendencia a mayor crecimiento en los tratamientos con adición de N. En febrero de 2020 (18FEB20) nuevamente el N limitó significativamente el crecimiento fitoplanctónico (p < 0,01). En los ensayos realizados a finales del año 2020 observamos un cambio de patrón, siendo el P el nutriente que incrementó significativamente (valores de p < 0,001) las tasas de crecimiento fitoplanctónico, tanto en el ensayo de septiembre (29SEP20) como en el de noviembre (5NOV20) (Figura 2, Tabla 2).

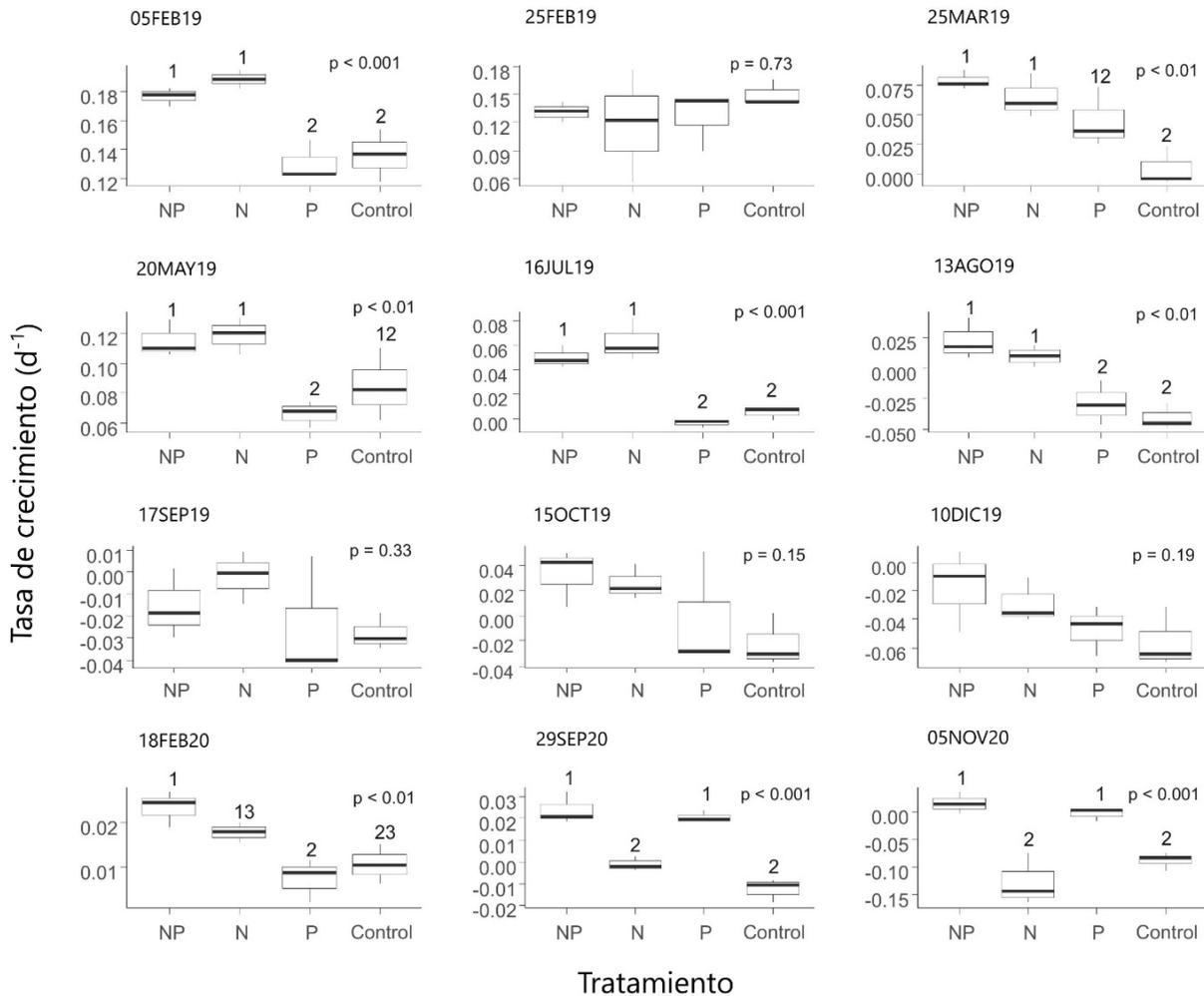


Figura 2. Tasa de crecimiento neto del fitoplancton en los tratamientos con distinta adición de nutrientes. Números diferentes sobre las barras de error indican diferencias significativas entre tratamientos (prueba de Scheffé).

Tabla 2.

Resultados de los ANOVAs testando los efectos de los tratamientos (N, P, NP y control) en las tasas de crecimiento fitoplanctónico. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Fuente de variación	gl	SC	MC	F	p	
05FEB19						
Tratamiento	3	0,008	0,003	17,86	< 0,001	***
Residuos	8	0,001	0,000			
25FEB19						
Tratamiento	3	0,002	0,001	0,44	0,73	n.s.
Residuos	8	0,010	0,001			
25MAR19						
Tratamiento	3	0,009	0,003	9,70	< 0,01	**
Residuos	8	0,003	0,000			
20MAY19						
Tratamiento	3	0,006	0,002	7,86	< 0,01	**
Residuos	8	0,002	0,000			
16JUL19						
Tratamiento	3	0,010	0,003	30,69	< 0,001	***
Residuos	8	0,001	0,000			
13AGO19						
Tratamiento	3	0,008	0,003	13,46	< 0,01	**
Residuos	8	0,002	0,000			
17SEP19						
Tratamiento	3	0,001	0,000	1,34	0,33	n.s.
Residuos	8	0,002	0,000			
15OCT19						
Tratamiento	3	0,006	0,002	2,38	0,15	n.s.
Residuos	8	0,007	0,001			
10DIC19						
Tratamiento	3	0,003	0,003	2,04	0,19	n.s.
Residuos	8	0,004	0,000			
18FEB20						
Tratamiento	3	0,000	0,000	9,78	< 0,01	**
Residuos	8	0,000	0,000			
29SEP20						
Tratamiento	3	0,003	0,001	38,48	< 0,001	***
Residuos	8	0,000	0,000			
05NOV20						
Tratamiento	3	0,042	0,014	18,33	< 0,001	***
Residuos	8	0,006	0,001			

4. Discusión

En ambientes acuáticos naturales no perturbados el P es frecuentemente el nutriente inorgánico que limita el crecimiento fitoplanctónico debido a que es relativamente escaso en la naturaleza, siendo la proporción de P en relación al N (relación N:P) en el agua de 28 (promedio para ríos; Hecky & Kilham, 1988) inferior a la encontrada en la composición elemental de las algas, en las que la relación N:P varía entre 5 (Healey, 1973) y 16 (Redfield, 1963). Sin embargo, se ha establecido claramente un cambio de limitación por P hacia limitación por N a medida que los cuerpos de agua incrementan su productividad, por lo que en cuerpos de agua sometidos a contaminación antrópica el N suele ser el principal nutriente limitante (Sterner, 2008). La Laguna Alalay ha sido caracterizada como un cuerpo de agua hiper-eutrófico desde hace más de dos décadas (Ayala, Acosta, Mooij, Rejas, & Van Damme, 2007; Campero et al., 2020; Maldonado & Goitia, 1993; Van Damme, Romero, & Goitia, 1998), por lo que los resultados de nuestros ensayos mostrando que el N es el principal nutriente que limita el crecimiento fitoplanctónico en la laguna Alalay concuerdan con lo expuesto anteriormente. Todos los ensayos realizados entre febrero de 2019 y febrero de 2020 mostraron una respuesta positiva a la adición de N, en algunos casos la respuesta fue leve y las diferencias no fueron significativas, pero el patrón se mantuvo constante a lo largo de todo ese período de tiempo.

Por el contrario, los ensayos realizados a fin de 2020 (29SEP20 y 5 NOV20) mostraron una respuesta significativa a la adición de P, mientras que la adición de N no causó respuesta alguna. Este cambio en la identidad del nutriente limitante podría deberse a un cambio en la composición del ensamblaje fitoplanctónico. Por ejemplo, las condiciones de limitación de N en general conducen a una dominancia de cianobacterias, las cuales se encuentran en ventaja competitiva debido a su capacidad de fijar N atmosférico e incorporarlo a su biomasa. Al incrementarse la fijación de N, el P puede limitar el desarrollo del fitoplancton. De igual manera, un cambio en la proporción de la carga de nutrientes, es decir en la relación N:P también puede resultar en cambios en la identidad del nutriente limitante. De acuerdo a Guildford & Hecky (2000) en cuerpos de agua con una relación TN:TP < 20 (molar) el

crecimiento fitoplanctónico estará limitado por el N, mientras que cuando la relación TN:TP > 50 (molar) el nutriente limitante será el P. Para obtener una mejor comprensión de la dinámica de la limitación de nutrientes en la laguna Alalay, es necesario estudiar la composición del fitoplancton y la relación de la carga N:P. Aun así, nuestros resultados permiten concluir que en las actuales condiciones el crecimiento fitoplanctónico en la Laguna Alalay está limitado principalmente por N.

Agradecimientos

Melina Campero, Mirtha Rivero y María F. Pericón participaron en la toma de muestras y medición de variables ambientales. El grupo de guardia municipal encargado de la laguna colaboró durante los muestreos.

5. Referencias bibliográficas

- Ayala, R., Acosta, F., Mooij, W. M., Rejas, D., & van Damme, P. A. (2007). Management of Laguna Alalay: A case study of lake restoration in Andean valleys in Bolivia. *Aquatic Ecology*, 41(4), 621–630. <https://doi.org/10.1007/s10452-007-9123-1>
- Bhagowati, B., & Ahamad, K. U. (2019). A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 19(1), 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002>
- Campero, M., Fernández, C. E., Rejas, D., Acosta, F., Rivero, M., & Castellón, D. (2020). Distintos escenarios de entrada de nutrientes para el control de la biomasa algal en la laguna Alalay. *Revista de Ciencias y Tecnología*, 1(11), 23–28.
- Elser, J. J., Bracken, M. E. S., Cleland, E. E., Gruner, D. S., Harpole, W. S., Hillebrand, H., ... Smith, J. E. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 10(12), 1135–1142. <https://doi.org/10.1111/J.1461-0248.2007.01113.X>
- Galford, A. E., & Sterner, R. W. (2000). Correlations and seasonal patterns in grazing and potential phytoplankton growth. *Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 27(5), 2996–3000.
- Guildford, S. J., & Hecky, R. E. (2000). Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship?. *Limnology and oceanography*, 45(6), 1213–1223.
- Gulati, R. D., & van Donk, E. (2002). Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state-of-the-art review. *Ecological Restoration of Aquatic and Semi-Aquatic Ecosystems in the Netherlands (NW Europe)*, 73–106.
- Healey, F. P. (1973). Inorganic nutrient uptake and deficiency in algae. *CRC Critical Reviews in Microbiology*, 3(1), 69–113.
- Hecky, R. E., & Kilham, P. (1988). Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology and Oceanography*, 33(4part2), 796–822. <https://doi.org/10.4319/LO.1988.33.4PART2.0796>
- Jilbert, T., Couture, R. M., Huser, B. J., & Salonen, K. (2020). Preface: Restoration of eutrophic lakes: current practices and future challenges. *Hydrobiologia*, 847(21), 4343–4357. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04457-x>
- Le Moal, M., Gascuel-Oudou, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Étrillard, C., Levain, A., ... Pinay, G. (2019). Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of the Total Environment*, 651, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>
- Maldonado, M., & Goitia, E. (1993). Bases limnológicas para la recuperación de la laguna Alalay (Cochabamba). *Publicaciones Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad Mayor de San Simón. Serie Científica*, 3, 1–35.
- Moss, B., Madgwick, J., & Phillips, G. (1997). *A guide to the restoration of nutrient-enriched shallow lakes*.
- Redfield, A. C. (1963). The influence of organisms on the composition of seawater. *The Sea*, 2, 26–77.
- Rejas, D., & Muylaert, K. (2010). Bottom-up and top-down control of phytoplankton growth in an Amazonian várzea lake. *Fundamental and Applied Limnology*, 176(3). <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2010/0176-0225>

- Scheffer, M. (1998). *Ecology of shallow lakes* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Scheffer, M., Hosper, S. H., Meijer, M. L., Moss, B., & Jeppesen, E. (1993). Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(8), 275–279.
- Sturner, R. W. (2008). *Review Paper On the Phosphorus Limitation Paradigm for Lakes*. <https://doi.org/10.1002/iroh.200811068>
- Van Damme, P. A., Romero, A. M., & Goitia, E. (1998). Estrategias para la recuperación y la conservación de la laguna Alalay (Cochabamba, Bolivia). *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 3, 59–72.
- Van der Does, J., Verstraelen, P., Boers, P., Van Roestel, J., Roijackers, R., & Moser, G. (1992). Lake restoration with and without dredging of phosphorus-enriched upper sediment layers. *Hydrobiologia*, 233(1), 197–210.

Dosificación experimental a nivel de laboratorio en hormigones lateríticos con el método IBRACON IPT

Romina Mendez¹, Boris C. Camacho^{1,*}

¹Laboratorio de Resistencia de Materiales y Estructuras, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*christianboriscamacho.p@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

El presente trabajo aplica el método de dosificación experimental IBRACON IPT en hormigones trabajados con agregado laterítico proveniente de Riberalta (Beni) a nivel de laboratorio mediante la caracterización mecánica. En la región amazónica de Bolivia la creciente demanda en la industria de la construcción vinculada con la tradición de utilizar agregados convencionales en obras civiles, ha generado la sobreexplotación de canteras y yacimientos escasamente disponibles en la zona, afectando en gran manera a la sostenibilidad de estos recursos; poniendo en riesgo la disponibilidad de materiales pétreos en el futuro. Asimismo, el costo de agregados pétreos en esta zona es tres veces más alto en relación a otras regiones de Bolivia donde se tiene mayor disponibilidad de agregados convencionales, esto debido a las distancias de transporte las cuales son de cientos de kilómetros en algunos casos. El material granular laterítico es presentado como alternativa de material de construcción para hormigones de trabajos civiles en general, dependiendo de la resistencia a compresión que este presente. Es así que, para la evaluación de las propiedades mecánicas a nivel laboratorio de este hormigón compuesto de laterita se realizaron 27 probetas las cuales se ensayaron a compresión a la edad de 7, 14 y 28 días, tomando en cuenta como variables independientes los trazos en relación cemento: agregados variando en 1: 5 ±1.5, se optó por una combinación de agregados hasta determinar el menor porcentaje de vacíos, como resultado se obtuvo 45% arena y 55% grava. El banco presentado con una combinación de 45/55 de agregados, llegó a una resistencia máxima de compresión de 29,34 MPa a la edad de 28 días.

Palabras clave: *Hormigón, Suelo Laterítico, Método de Dosificación IPT, Laboratorio.*

Abstract

The present work applies the IBRACON IPT experimental dosage method in concrete worked with lateritic aggregate from Riberalta (Beni) at the laboratory level through mechanical characterization. In the Amazonian region of Bolivia, the growing demand in the construction industry and the tradition of using conventional aggregates in civil works has generated the overexploitation of quarries and scarcely available deposits in the area, greatly affecting the sustainability of these resources and putting at risk the availability of stone materials in the future. Also, the cost of stone aggregates in this area is three times higher than the cost in other regions of Bolivia where there is greater availability of conventional aggregates, due to the transportation distances which are hundreds of kilometers in some cases. The lateritic granular material is presented as an alternative construction material for concrete for civil works in general. For the evaluation of the mechanical properties at the laboratory level of this laterite composite concrete, 27 specimens were made, which were tested in compression at the age of 7,14 and 28 days, taking into account as independent variables the traces in relation to cement. aggregates varying this in 1: 5 + 1.5, a combination of aggregates was chosen until determining the lowest percentage of voids, as a result 45% sand-55% gravel was obtained. The bench presented with a combination of 45/55 aggregates reached a maximum compressive strength of 29.34 MPa at the age of 28 days.

Key words: *Concrete, Lateritic Soil, IPT Dosing Method, Laboratory.*

1. Introducción

Hormigones o concretos, dos palabras cuyo significado y aplicación tienen gran importancia dentro del área de la construcción en el mundo, se conoce que esta mezcla se conforma por elementos base como el cemento portland, agregados, agua y aire, caracterizado por su variabilidad, trabajabilidad, durabilidad y resistencia a fuerzas de compresión, siendo actualmente el material más utilizado en el mundo. Se han realizado cuantiosas investigaciones cuyos resultados mostraron hallazgos cada vez más interesantes dentro del mejoramiento de las propiedades del hormigón.

El uso de materiales alternativos en la construcción civil solo es posible cuando presentan estudios científicos y ventajas económicas que avalen su uso. (Rodríguez Pantoja Junior & de Souza Picanço, 2020). Los suelos tropicales tienen un comportamiento peculiar en relación a otros suelos, lo que hace necesario investigar la influencia de la cementación creada por la meteorización (Queiroz de Carvalho et al, 2005).

La búsqueda de alternativas que apunten a satisfacer la demanda comercial de un sector de la economía en constante expansión, incluso en tiempos de crisis económica, y que, al mismo tiempo, no intensifique la degradación del medio ambiente, la inclusión de elementos alternativos al hormigón es muy prometedora, para la exploración de agregados alternativos de sus diversos suelos. (Gonçalves et al, 2021).

De esta forma, el presente trabajo busca expandir el conocimiento acerca del uso de materiales lateríticos formados en suelos orientales bolivianos, estos suelos presentan características físicas, químicas y mineralógicas muy particulares que influyen en el comportamiento de estos agregados con el concreto. Es así que, el presente artículo se enfoca en la resistencia del hormigón aplicada a estructuras tomando en cuenta el tiempo de curado, la porosidad, el contenido de humedad (%), la relación agua cemento (a/c) y la modificación del tamaño de grano mediante la inserción de arena laterítica.

La resistencia a compresión es totalmente dependiente de las variables antes mencionadas y los materiales a utilizar, por lo que es necesario conocer todas las variables que intervienen en el diseño de mezclas,

tal como lo menciona Tutikian y Helene (2011), el objetivo de un estudio de dosificación es obtener una resistencia determinada, sin dejar de lado la economía y la sostenibilidad que deben guiar siempre un estudio de dosificación. Por esta razón la industria de la construcción a nivel nacional siempre busca alternativas para reducir los costos y promover prácticas eco sostenibles, valorando siempre los materiales encontrados regionalmente a nivel Bolivia.

2. Materiales y Métodos

Suelos lateríticos en Bolivia

Los suelos lateríticos en Bolivia se forman en las regiones del oriente y noreste del país, debido a las diversas condiciones favorables que aportaron distintas eras geológicas y a las condiciones climáticas intensas de estas regiones (temperaturas elevadas, alta pluviosidad etc.). Las zonas con suelos lateríticos en Bolivia abarcan las provincias Chiquitos, Sandóval, Velasco, Ñuflo de Chávez en Santa Cruz, provincias Iténez, Yacuma, Vaca Diez en Beni y parte de la provincia Federico Román en Pando. La extracción de este material se presenta en la Figura 1.



Figura 1. Extracción de grava laterítica Beni - Riberalta.

Arena residual

Como material fino, para la investigación se decidió utilizar arena residual, esta es muy común encontrarla por acopios en las ciudades del oriente, la muestra a usar tiene como procedencia la ciudad de Riberalta (Figura 2).



Figura 2. Extracción de arena residual de acopio en la ciudad de Riberalta.

Dosificación del hormigón

Obtener hormigones de calidad dentro la industria de la construcción va ligada con la dosificación de diseño, esta depende de:

- Control, manejo y almacenamiento de materiales.
- Caracterización de agregados.
- Preparación y pesaje de material.
- Condiciones de mezclado según la ASTM C-94.

El análisis previo de los materiales influye en la determinación óptima de cantidades, el cual deberá ir de acuerdo con los requerimientos de diseño, sea de manera teórico, empírico o empírico directo.

Método experimental de dosificación IBRACON IPT

El método de dosificación experimental IBRACON IPT, se caracteriza por combinar leyes teóricas combinadas con estudios experimentales realizados previamente en laboratorio, “una dosificación experimental tendrá por fin establecer un trazo de concreto para que este tenga una resistencia y una trabajabilidad previstas, este último expresado por la consistencia” (Helene & Terzian, 1992).

Leyes teóricas con aplicación en hormigones

Según Tutikian & Helene (2011), la aplicación de hormigones se rige con base a tres leyes de comportamiento:

- **Ley de Abrams (1918):** la resistencia a una edad determinada (f_{c_j}), es inversamente proporcional a la relación agua/cemento (a/c).

$$f_{c_j} = \frac{k_1}{k_2 a/c} \quad (1)$$

- **Ley de Lyse (1932):** la consistencia del concreto fresco depende preponderantemente de la cantidad de agua por metro cúbico de concreto.

$$m = k_3 + k_4 * \frac{a}{c} \quad (2)$$

- **Ley de Prizskulnik & Kirilos (1972):** Este indica que el consumo de cemento por m^3 de hormigón varía en proporción inversa a la relación en masa seca de áridos/cemento (m).

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 * (m)} \quad (3)$$

donde:

f_{c_j} : Resistencia del hormigón (Edad j).

m = combinación de agregados gruesos y finos.

C = consumo de cemento por metro cúbico.

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ = constantes de materiales específicos obtenidos por regresión.

El método IBRACON explica que a mayor compacidad entre agregados, se obtendrá un menor consumo de agua, por lo que a menor relación a/c se presentaran mayores resistencias y viceversa. Para llevar a cabo dicho proceso se deben tomar en cuenta los siguientes comportamientos en la mezcla:

- **Contenido de mortero seco**

$$\alpha = \frac{1+a}{1+m} \quad (4)$$

- **Relación agua/material**

$$H = \frac{a/c}{(1+m)} \quad (5)$$

- **Consumo de cemento por m^3**

$$C = \frac{\gamma}{1+a+\rho+\frac{a}{c}} \quad (6)$$

donde:

γ =densidad del concreto (kg/m^3)

a = relación agregado fino seco.

ρ = relación agregado grueso seco.

Donde se conoce que la combinación de agregados gruesos y finos será igual a la ecuación (7):

$$m = a + \rho \quad (7)$$

Trazo de diseño ($c: m$)

Según Tutikian & Helene (2011), manteniendo constante el contenido de mortero seco en relación a

agua/materiales secos, se calcula analíticamente las proporciones para tres trazos, uno más rico tipo (1: m-1 o 1: m-0,5) y uno más pobre tipo (1: m+1 o 1: m+0,5).

La principal característica de determinar el trazo de diseño para la dosificación experimental es que esta podrá ser aplicada en mezclas que contengan materiales iguales o similares a los aplicados inicialmente, como ser, material granular grueso y fino, tipo de cemento a usar, aditivos, etc, a través de una correlación trabajando con el diagrama de dosificación IPT.

Diagrama de dosificación IPT

Introducido por Prizskulnik & Kirilos, en 1974, el diagrama de dosificación IPT muestra gráficamente el comportamiento de la mezcla del hormigón en diferentes aspectos, los cuales se muestran en tres cuadrantes descritos a continuación:

Ic: Se muestra la curva ajustada en base a la relación a/c y f'c, a diferentes edades, correspondiendo a la (ec.1), ley de Abrams.

Iic: Se relacionan los datos a/c, proporción de agregados (m), según la (ec.2), ley de Lyse.

IIic: Correlaciona los resultados en base a la (ec.3), ley de Prizskulnik & Kirilos.

El resultado que se busca obtener a través de las 3 leyes teóricas (ec.1, 2 y 3) se muestra a continuación en la Figura 3.

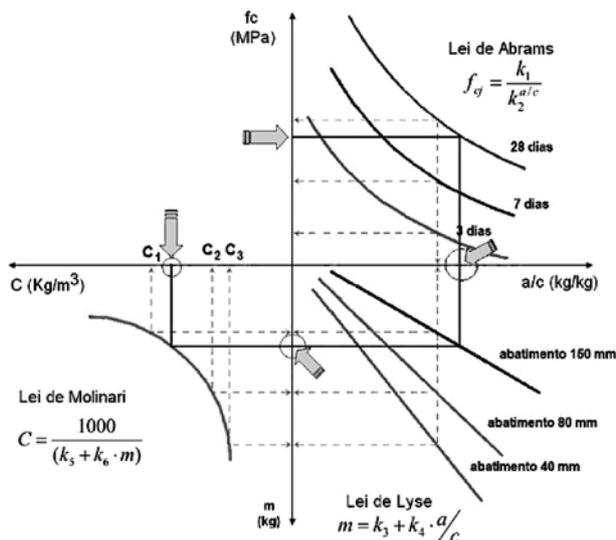


Figura 3. Diagrama de dosificación IBRACON IPT (Helene & Terzian, 1992).

Comportamiento mecánico ensayos de hormigón

Determinar el efecto que proporcionan los materiales lateríticos en el comportamiento mecánico del hormigón es elemental, pues a través de este se puede determinar el tipo de aplicación directa según su capacidad de resistencia para el tipo de carga a soportar.

Resistencia a compresión (f'c)

Este método de prueba cubre la determinación de resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto tales como moldeados cilindros y núcleos perforados. (ASTM C39, 2018)

Según Borges Pompeu Neto (1976), la resistencia del concreto es influenciada principalmente por los siguientes factores:

- Factor agua/cemento
- Proporción cemento/agregados (Trazo)
- Gradación, textura, forma, Resistencia y dureza de las partículas del agregado.
- Tamaño máximo del agregado.

Los resultados a compresión dependerán también de las dimensiones de la probeta y principalmente de la ejecución de vaciado de esta.

3. Resultados y Discusión

Ensayos experimentales ejecutados en laboratorio

Para llevar a cabo el proceso de investigación, se dividió esta en 3 fases, las cuales son:

Fase I: Caracterización de agregados finos y gruesos

El material granular fue preparado inicialmente mediante un proceso de lavado y secado a una temperatura de 100°C , la arena residual, únicamente se secó y posteriormente se realizó la caracterización física de los mismos.

Debido a su proceso de formación, las concreciones lateríticas presentan una gran cantidad de material pulverulento (Gonçalves Duarte Mendonça et al, 2021). Esto se evidenció a través de la comparación entre aguas de lavado, se nota claramente que esta no cambia de color por la gran cantidad de finos que contiene.

Granulometría del agregado grueso

Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la clasificación de los materiales propuestos para su uso como agregados. Los resultados determinan el cumplimiento de la distribución de tamaño de partícula, y proporciona los datos necesarios para el control de la producción de diversos productos de agregados y mezclas. (ASTM C136, 2018)

La Figura 4 presenta la distribución granulométrica del árido empleado en la investigación el cual presenta un tamaño máximo de 1" y tamaño máximo nominal de 3/4". La Tabla 1 muestra el resultado de la composición granulométrica para el banco estudiado.

Si bien la curva granulométrica del agregado grueso se encuentra fuera de los límites superior e inferior propuestos por la ASTM C-33, esto no afecta la dosificación puesto que, al aplicar el método de dosificación de tipo experimental IBRACON – IPT, el material granular puede ser utilizado sin problemas ya que se consideró una combinación óptima de agregados finos y gruesos, explicado a continuación en la fase II.

Tabla 1

Composición granulométrica agregado grueso (banco 3)

PROCEDENCIA		BANCO 3	
Tamiz	Abertura (mm)	%Retenido tamiz	%Que pasa
2"	50,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	19,20	80,80
3/8"	9,50	14,22	66,58
N°4	4,75	54,77	11,81
Bandeja	-----	11,81	0,00
Módulo de fineza:		6,22	

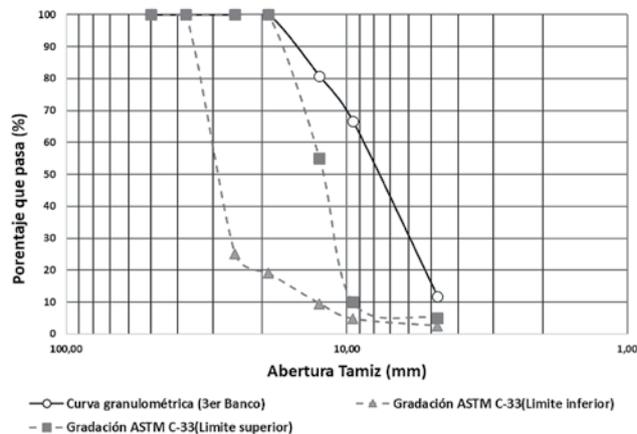


Figura 4. Curva granulométrica grava 3/4" (Banco 3).

Granulometría de la arena residual

La composición granular de la arena residual se muestra en la Tabla 2, seguida de la curva granulométrica en la Figura 5, donde se obtuvo un módulo de fineza de 2,25.

Tabla 2

Composición granulométrica arena residual

Tamiz	Abertura (mm)	%Retenido tamiz	%Que pasa
3/8"	9,50	0,00	100,00
N°4	4,75	0,13	99,87
N°8	2,36	1,94	97,93
N°16	1,18	10,63	87,30
N°30	0,60	28,94	58,36
N°50	0,30	35,23	23,13
N°100	0,15	14,97	8,16
N°200	0,08	6,55	1,60
Bandeja	-----	1,60	0,00
Módulo de fineza:		2,25	

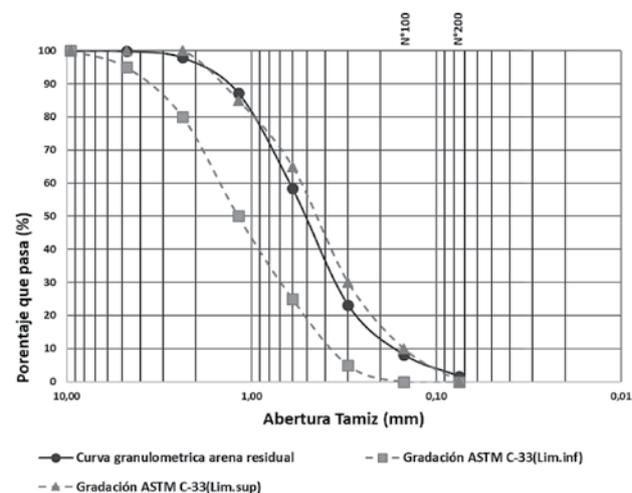


Figura 5. Curva granulométrica arena residual.

Peso específico (γ) y porcentaje de absorción

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad media de una cantidad de partículas de áridos gruesos (sin incluir el volumen de huecos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. (ASTM C127, 2017)

Los resultados obtenidos al ejecutar el ensayo de peso específico (Tabla 3), nos arrojan valores que se encuentran dentro del rango promedio de agregados convencionales, los cuales van de 2,133 gr/cm³ a 2,837 gr/cm³, se obtuvo un 11% como valor para el porcentaje de absorción, esto es normal al tratarse de arcillas consolidadas donde normalmente la absorción suele ser de hasta el 15%.

Tabla 3

Peso específico y % de absorción del agregado grueso laterítico y arena residual

Tipo de Material	γ seco (gr/cm ³)	γ aparente (gr/cm ³)	% absorción
Grava laterítica	2,133	2,837	11,635
Arena residual	2,558	2,676	1,717

Los valores obtenidos de peso específico se usarán para obtener la combinación de agregados óptima a aplicar en la dosificación (Fase II).

La densidad relativa (gravedad específica) también se utiliza en el cálculo de porcentaje de vacíos en los áridos en el método de ensayo (ASTM C 29,2017).

Peso unitario suelto (P.U.S) y compactado (P.U.C)

Este método de ensayo determina la densidad aparente (peso unitario) de los áridos compactados o sueltos y los vacíos calculados entre las partículas de los áridos finos, gruesos, o agregados mixtos basados en la misma determinación, aplicable a los agregados que no excedan de 5 pulg. (125 mm) de tamaño máximo nominal (ASTM C29, 2017), los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso laterítico y arena residual

Tipo de material	P.U.S (gr/cm ³)	P.U.C (gr/cm ³)
Grava laterítica	1,145	1,264
Arena residual	1,559	1,721

A partir de los cálculos realizados según las ecuaciones indicadas por la ASTM C29, se obtuvieron como resultado los valores indicados en la Tabla 4, donde los valores usuales de peso unitario suelto se encuentran entre 1.5 - 1.6 para gravas, 1.4 - 1.5 para arenas y los valores usuales para peso unitario compactado son 1.6 – 1.9 para gravas, 1.5 – 1.7 para arenas, partiendo de estos, es posible evidenciar que los resultados obtenidos para la grava laterítica del banco estudiado y la arena residual se encuentran dentro de los parámetros considerados para el diseño de un buen hormigón aplicado a obras civiles.

Resistencia a la degradación del agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de los Ángeles

El porcentaje de desgaste de la grava laterítica, tomando en cuenta la distribución granulométrica, donde se conoce que el tamaño máximo nominal es de 3/4", a partir de este dato se adoptó el tipo de gradación (B y C), se utilizaron 11 y 8 esferas respectivamente como carga. Los resultados se indican en la Tabla 5.

Para un tamaño máximo nominal de 19,0 mm (3/4 pulgadas) de agregado grueso de 19.0 mm (3/4 pulg.) con pérdidas porcentuales en el rango de 10 a 45 %. (ASTM C131, 2020)

Tabla 5

Resultados resistencia a la degradación del agregado grueso laterítico

Tipo de material granular	Gradación tipo	%Desgaste
Grava laterítica	B	45,55
	C	36,52

Tomando en cuenta el dato anteriormente mencionado se evidenció que la grava laterítica presenta pérdidas considerables, pero se mantiene dentro del rango especificado por la ASTM C131, para una gradación tipo B con un valor de desgaste de 45.55% y para una gradación tipo C de 36,52%. Estos valores difieren en cantidad con los valores de los agregados convencionales ya que estamos tratando con un material arcilloso con un cierto grado de compactación.

Fase II: Combinación óptima de agregados finos y gruesos

La relación de agregados óptima, entre gruesos y finos se realizó a través del método cubano Viterbo O'Reilly donde se busca obtener el menor porcentaje de vacíos. Para determinar el menor porcentaje de vacíos con los agregados trabajados se definieron 11 mezclas en diferentes proporciones de porcentaje, donde el primer paso a realizar fue determinar la densidad o peso específico de la mezcla de agregados (8), la Figura 6 presenta una de las combinaciones realizadas:

$$D_m = \frac{\gamma_{arena} * \%A + \gamma_{grava} * \%G}{100} \quad (8)$$

Donde:

D_m: Peso específico corriente de la mezcla de agregados.

γ_a: Peso específico corriente o seco de la arena

γ_g: Peso específico corriente o seco de la grava

%A: Porcentaje de la arena en la mezcla

%G: Porcentaje de la grava en la mezcla

El segundo paso fue determinar el % de vacíos en relación al peso unitario de la mezcla (9):

$$\%vacios = \frac{D_m - P.U.C_m}{D_m} * 100 \quad (9)$$

Donde:

P.U.C m= Peso unitario compactado de la mezcla de agregados.

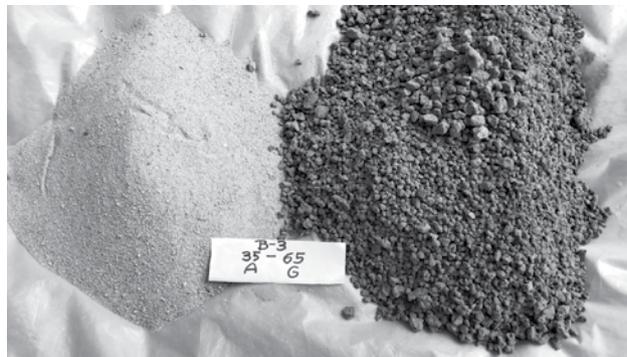


Figura 6. Material usado para la ejecución de combinación 45%grava-55%arena.

El procedimiento propuesto por el cubano Viterbo O'Reilly recomienda la combinación grava/arena que proporcione el menor contenido de vacíos, el contenido del cemento y del agua, los cuales determinan mediante factores que dependen de la relación agua-cemento y de la consistencia deseada en la mezcla. Recomendado cuando se tiene agregados de forma y tamaño irregular. (Yoc Juárez, 2007)

Los resultados producto de las diferentes combinaciones realizadas se muestran en la Tabla 6.

La tabla 6 muestra los resultados obtenidos donde el porcentaje de vacíos mínimo es de 25,464 para una proporción de 50% arena y 50% grava, optando por la combinación de 45% arena y 55% grava para la mezcla (m), la curva ajustada para el porcentaje de vacíos se muestra en la figura 7.

Tabla 6

Combinación de agregados vs. % vacíos

Nº Ensayo	Proporción De Agregados		% De Vacios 45%- 55%
	Arena	Grava	
1	35%	65%	30,734
2	40%	60%	29,725
3	45%	55%	28,939
4	50%	50%	25,464
5	55%	45%	26,655
6	60%	40%	26,433
7	65%	35%	26,345
8	75%	25%	28,409
9	80%	20%	30,567
10	85%	15%	31,857
11	90%	10%	34,089

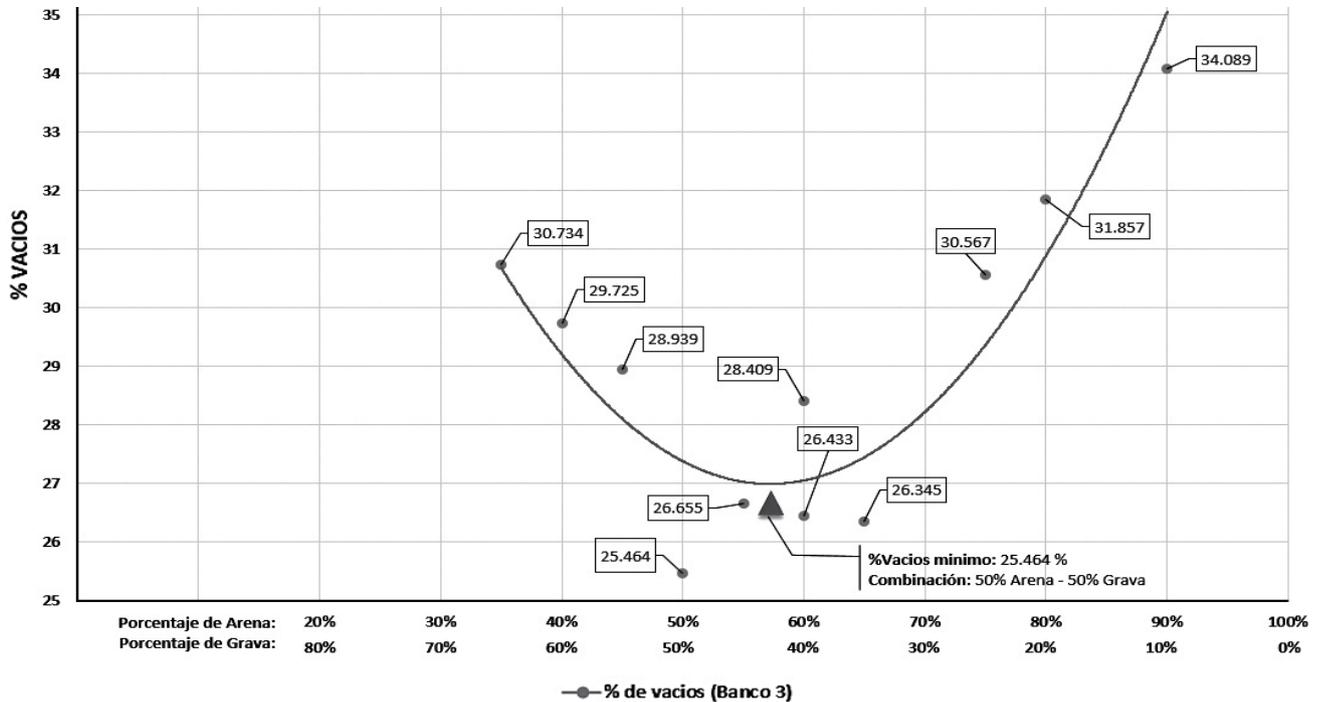


Figura 7. %Vacíos mínimo, combinación 45% arena - 55% grava.

Fase III: Cálculo del contenido óptimo de mortero seco por el método IBRACON – IPT

Trazos de dosificación

La tercera fase de investigación realiza la gráfica de dosificación IPT se necesita variar los trazos, mínimamente en 3 puntos, para este trabajo se asumieron los siguientes trazos (Tabla 7):

Tabla 7

Trazos usados para la dosificación experimental

Trazos utilizados	
Trazo rico	1: 3,5
Trazo medio	1: 5,0
Trazo pobre	1: 6,5

De esta forma se trabajó variando el trazo en 1: 1,5. Según Helene & Terzian (1992), la falta de mortero en la mezcla provoca porosidad en el hormigón o fallos de hormigonado. Sin embargo, el exceso da mejor apariencia al concreto, pero aumenta el costo por metro cubico, así como el riesgo de agrietamiento por origen térmica por contracción de secado. (Helene & Terzian, 1992)

Rotura a compresión de probetas con hormigón laterítico

Para evaluar las propiedades mecánicas del hormigón laterítico, se optó por el uso de probetas cilíndricas con dimensiones de 10 cm x 20 cm, tal como se muestra en la Figura 8, la muestra empleada para esta investigación consta de 27 cuerpos cilíndricos, los cuales fueron desencontrados después de 24 horas del vaciado, seguidamente se sumergieron en piscinas con agua, donde permanecieron inmersos hasta las fechas de ruptura, en intervalos de 7, 14 y 28 días después de su fabricación. Para la elaboración de este hormigón se tomó como rango de asentamiento 8 ± 2 cm.



Figura 8. Ensayo a compresión en cilindros de hormigón laterítico.

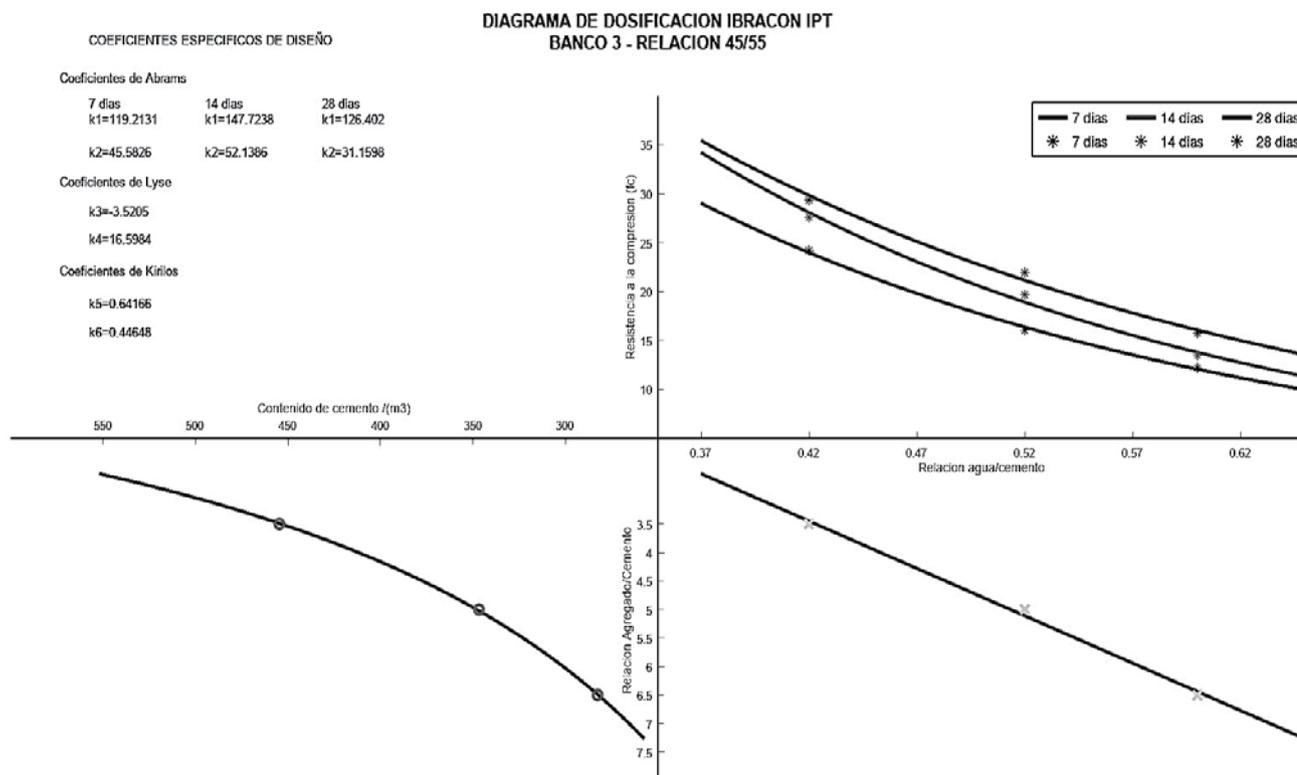


Figura 9. Diagrama de dosificación IPT – Banco 3 (combinación arena/grava- 45/55).

Diagrama IPT

Con base a las leyes teóricas de aplicación en hormigones, se obtuvo el diagrama de dosificación IPT de hormigones lateríticos, el mismo que se detalla en la Figura 9. Con los datos de las resistencias a compresión a los 7, 14 y 28 días, la relación agua/cemento, combinación de agregados y cantidad de cemento por metro cubico empleado (tomando como dato base las densidades de las mezclas obtenidas *in situ* al momento de realizar el vaciado de los cilindros).

Resultados obtenidos a compresión

La Tabla 8 detalla los resultados a compresión obtenidos a los 7, 14 y 28 días, así como la línea de tendencia según el trazo utilizado (Figura 10), donde el trazo 1:3.5 presenta el punto más alto y el trazo 1:6.5 el punto más bajo de la resistencia, presentaron un consumo de cemento por metro cubico igual a (Tabla 9):

Tabla 8

Resistencia a compresión obtenida a los 7, 14 y 28 días de edad

Combinación De Agregados Arena-Grava	Edad (Días)	Trazo	Promedio Resistencia (MPa)
45%-55%	7	1:3,5	24,183
		1:5,0	16,033
		1:6,5	12,187
	14	1:3,5	27,580
		1:5,0	19,667
		1:6,5	13,477
	28	1:3,5	29,337
		1:5,0	21,923
		1:6,5	15,733

Tabla 9

Relación agua/cemento y cantidad de cemento calculado

Número de banco	Relación a/c	Cantidad de cemento/m ³
B3 (45/55)	0,42	454,64
	0,52	346,76
	0,60	282,58

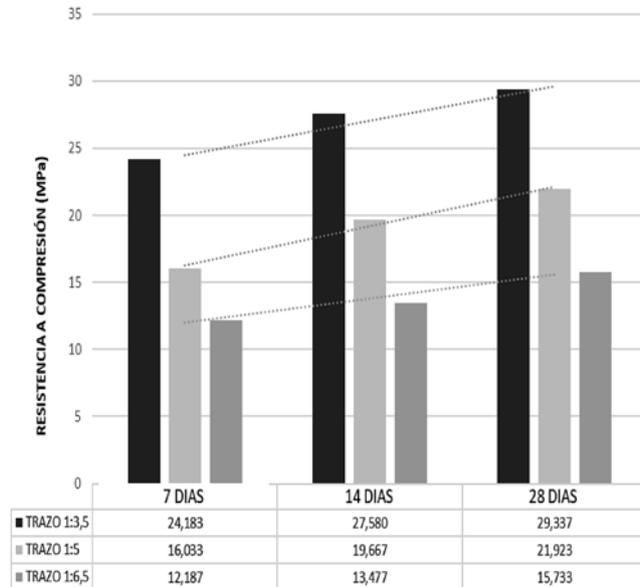


Figura 10. Comparación de la resistencia a compresión a los 7,14 y 28 días.

4. Conclusiones

- Este estudio ha demostrado que aplicar el método de dosificación experimental IBRACON IPT en hormigones trabajados con agregados lateríticos provenientes Riberalta (Beni), dio como resultado un proceso práctico, eficaz, con un proceso de elaboración de muestras sencilla y adecuado a las condiciones de diseño que se tenían planteadas inicialmente, lo que resultó como óptimo, este le otorga importancia práctica para su aplicación en proyectos.
- Se logró demostrar que, al variar los trazos de dosificación, las resistencias a compresión presentan cambios considerables, mientras el trazo sea pobre las resistencias serán superiores y viceversa.
- Uno de los hallazgos más importantes encontrados en este estudio es el control que se tuvo con los datos de a/c, combinación de agregados a través de la determinación de la cantidad de mortero seco (α), permitiendo el control sobre los cuerpos de prueba, donde se obtuvieron probetas con una mínima cantidad de cangrejeras y sin presencia de fisuras.
- Comparando con los materiales convencionales, el material laterítico presenta un mayor

porcentaje de absorción (6 -13%), lo cual no fue inconveniente para su aplicación mediante la dosificación experimental aplicada en laboratorio.

- Este proyecto se llevó a cabo para diseñar y evaluar las propiedades mecánicas del hormigón utilizando grava laterítica, donde se obtuvo resultados a compresión de 29,337 MPa a los 28 días siendo este superior a los 21 MPa (resistencia mínima para hormigones), superando las expectativas al tratarse de un material arcilloso. Estos resultados están limitados para el uso en hormigones con material laterítico.
- Estos resultados podrían no ser aplicables para los hormigones con agregados pétreos, sin embargo se puede aplicar el método IBRACON como dosificación con los materiales granulares existentes en los 9 departamentos de Bolivia, sin presentar problema con el tipo de cemento a usar, ya que este método se ajusta a las condiciones de diseño que se le presenta por regiones.
- Los métodos utilizados permitirán que el material laterítico pueda aplicarse a trabajos de construcción vial o estructural en el oriente boliviano, ya que se demostró que cumple con los criterios mínimos requeridos para hormigones estructurales según normas ASTM.
- Esta investigación servirá como base para futuros estudios en Bolivia, buscando siempre ampliar el conocimiento, sin olvidar el correcto aprovechamiento de materiales producidos por los suelos bolivianos a un costo reducido, evitando el sobre costo y la contaminación innecesaria por el transporte de materiales interdepartamentales.

5. Referencias bibliográficas

- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C127: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. USA.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C128: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. USA.

- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C29: Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. USA.*
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. USA.*
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. USA.*
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C131: Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. USA.*
- Borges Pompeu Neto, B. (1976). *Um estudo sobre as propriedades de resistencia mecanica de Concreto laterítico.* Estado da Paratba - Brasil: Universidade Federal da Paratba centro de ciencias e tecnologia - CCT.
- Campos Martins, E. A. (1990). *Estudo comparativo entre concretos de cimento portland pozolânico fabricados com agregados graúdos convencionais e não convencionais.* Campina Grande - PB: Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.
- Caviedes, J. L. (s.f.). En *Tecnología del concreto* (págs. 337 - 349).
- Filho, M. B. (2005). *Estudo de agregados lateríticos para utilizacao em concretos estruturais.* Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande Centro de Ciências e Tecnologia.
- Gonçalves Duarte Mendonça, A. M., Costa de Souza, L. M., Coutinho Lira, Y., Ferreira de Sousa Neto, V., Bezerra Luz, T. E., Gonçalves Luz Nunes, C., . . . Lacerda Diniz, M. I. (2021). Uso de agregado laterítico na produção do concreto: avaliação da resistência. *Brazilian Journal of Development*, 1-11.
- Helene, P., & Terzian, P. (1992). *Manual de dosagem e controle do concreto.* Sao Paulo: PINI. ISBN: 85-7266-007-0.
- Queiroz de Carvalho, J., Martinez, G., & Flores, J. (2005). Chemical and mineralogical properties of residual tropical soils and their relationships with selected geotechnical properties. En *Advanced experimental unsaturated soil mechanics* (pág. 425). Trento- Italia: Prensa CRC.
- Rodrigues Pantoja Junior, A., & de Souza Picanço, M. (2020). Concreto produzido com agregado graúdo laterítico em santarém, pará. *REEC-Revista electronica de engenharia civil*, 1-18.
- Tutikian, B., & Helene, P. (2011). Dosagem dos concretos de cimento Portland. En *Concreto: Ciencia e Tecnologia* (pág. Capítulo 12). Sao Paulo : IBRACON .
- Yoc Juárez, E. (2007). *Evaluación de concretos elaborados de acuerdo a los Métodos de diseño "Vitervo O'Reilly y práctica estándar de selección de Proporciones de concreto de masa normal y pesada (ACI 211.1)".* Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Efecto del empaquetamiento del agregado mediante la aplicación del método Bailey en el desempeño a deformación permanente de mezclas asfálticas

Edgar J. Ibañez¹, Jahel S. Ledezma^{1,*}

¹Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*sarvialedezma@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

El ahuellamiento en mezclas asfálticas es un deterioro producido tanto por factores extrínsecos, tales como el aumento de cargas de tránsito o efectos climáticos, como por factores intrínsecos, debido al tipo de cemento asfáltico o la estructura del agregado. Siendo que este último ocupa entre el 90 a 95% del volumen total de la mezcla asfáltica, la presente investigación estudia el efecto de la aplicación del método Bailey en el empaquetamiento del agregado y su relación con el desempeño a deformación permanente. Para esto, se diseñaron cuatro mezclas empleando dos tipos de cemento asfáltico con clasificación 85/100 y 60/70, dos de ellas diseñadas de forma convencional y las otras dos con el método Bailey, las cuales posteriormente fueron ensayadas en la rueda de Hamburgo.

Tras la evaluación de los resultados obtenidos, se observa que para las dos mezclas elaboradas con cemento asfáltico 85/100 fue más preponderante el tipo de cemento asfáltico elegido que el empaquetamiento del agregado, debido a que el ensayo tuvo que ser interrumpido a las 10000 pasadas porque estas alcanzaron una deformación superior a los 20mm. En cambio, respecto a las dos mezclas que se diseñaron con cemento asfáltico 60/70, fue posible evidenciar el efecto del empaquetamiento del agregado en la deformación permanente, ya que la mezcla diseñada con el método Bailey al presentar una velocidad de deformación menor no evidenció falla por stripping, tal como ocurrió con la mezcla diseñada por el método convencional, el mismo que presentó este tipo de falla a las 1600 pasadas.

Palabras clave: *Mezcla asfáltica, Deformación permanente, Método Bailey, Punto de stripping.*

Abstract

Rutting in asphalt mixtures is a deterioration caused by extrinsic factors, such as increased traffic loads or climatic effects, and by intrinsic factors, due to the type of asphalt cement or the structure of the aggregate. Since the latter occupies between 90 and 95% of the total volume of the asphalt mixture, this research studies the effect of the application of the Bailey method in the packing of the aggregate and its relationship with the behavior of permanent deformation. For this, four mixtures were designed using two types of asphalt cement with classification 85/100 and 60/70, two of them designed in a conventional way and the other two with the Bailey method, which were later tested in the Hamburg wheel.

After evaluating the results obtained, it observed for the two mixtures made with 85/100 asphalt cement, the type of asphalt cement be more predominated than the aggregate packing, because the test had to be interrupted at 10000 passes by the reason of these reached a deformation greater than 20mm. On the other hand, with respect to the two mixtures that were designed with 60/70 asphalt cement, it was possible to demonstrate the effect of aggregate packing on permanent deformation, since the mixture designed with the Bailey method, when presenting a lower deformation rate, did not present a failure due to stripping, as occurred with the mixture designed by conventional method, the same one that presented this type of failure at 1600 passes.

Key words: *Asphalt mixture, Permanent deformation, Bailey method, Stripping point.*

1. Introducción

Una mezcla asfáltica está constituida por la unión de cemento asfáltico y agregados pétreos. Cada uno de estos componentes tiene un papel fundamental en el desempeño futuro del pavimento flexible. El cemento asfáltico actúa como un material ligante vinculando los agregados pétreos, y estos a su vez, se constituyen en el esqueleto de la mezcla otorgándole resistencia, rigidez y por ende durabilidad en función a las características de su gradación (Rondon y Reyes, 2015). El adecuado desempeño de una mezcla asfáltica debe proyectarse desde su diseño en laboratorio, esto implica una idónea combinación de sus constituyentes para disminuir la ocurrencia de fallas, que entre las más comunes se tiene la falla por humedad, fatiga y deformación permanente. Este último tipo de patología es altamente dependiente de las características del agregado pétreo, el grado de trituración, forma, tamaño y granulometría, los cuales contribuyen a la fricción interna que los agregados proporcionan a la mezcla asfáltica (Garnica *et al*, 2005). Comúnmente, para el diseño de la mezcla asfáltica, la selección de la estructura del agregado utiliza criterios definidos por la faja

granulométrica de la especificación técnica vigente, el mismo que asegura la densificación del material. Es así que, aportando al control de este aspecto, el ingeniero Robert Bailey basado en conceptos de trabazón y empaquetamiento, propone una relación entre la granulometría y los parámetros volumétricos que aportan a la revisión de la estructura granular (Maldonado, 2018). En este sentido, el presente estudio, evalúa experimentalmente la propuesta del método Bailey en el empaquetamiento del agregado analizando si este influye en el desempeño a deformación permanente de la mezcla asfáltica.

2. Materiales y métodos

2.1 Caracterización de los agregados pétreos

Los agregados pétreos utilizados para el desarrollo de los ensayos provienen de la cantera Parotani – Cochabamba, empleándose tres tipos de tamaño de agregados (3/4”, 3/8” y arena natural) para el diseño de las mezclas. De esta forma, los ensayos realizados para determinar las propiedades y características de los agregados pétreos se describen en la Tabla 1.

Tabla 1

Caracterización de los agregados pétreos

Ensayo	Unidad	Norma	Limite	Resultado	Verificación
Agregado Grueso					
Gravedad específica del agregado grueso	g/cm ³	ASTM C127	-	2.77	-
Abrasión de los Ángeles	%	ASTM C131	Máx 40%	30.03	Cumple
Caras fracturadas	%	ASTM D5821	Min 90%	80	No cumple
Resistencia a los sulfatos (Sanidad)	%	ASTM C2419	Máx 12%	10.58	Cumple
Agregado Fino					
Gravedad específica del agregado fino	g/cm ³	ASTM C128	-	2.69	-
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	Min 45%	86.16	Cumple

Fuente: Autores

2.2 Caracterización del cemento asfáltico

Los cementos asfálticos empleados son de procedencia peruana y se clasifican según su grado de penetración en 85/100 y 60/70. La Tabla 2 enlista los ensayos realizados, las normas empleadas y los resultados obtenidos de su caracterización en laboratorio.

Tabla 2

Caracterización del cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado	Resultado	Verificación
				85/100	60/70	
Penetración a 25°C	mm	ASTM D5	Min 60	80.92	60.67	Cumple
Peso específico del asfalto a 25°C	g/cm ³	ASTM D71	-	1.022	1.052	-
Ductilidad a 25°C	cm	ASTM D113	Min 100	102.33	107	Cumple
Recuperación elástica a 25°C	%	ASTM D6084-06	-	16	5.9	-
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36/D-36M	-	42.9	45.8	-
Punto de inflamación	°C	ASTM D92-11	-	314.6	312.6	-

Fuente: Autores

2.3 Composición granulométrica

La composición granulométrica para el diseño de las mezclas asfálticas siguió las especificaciones técnicas de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC, 2011). Se optó por la faja granulométrica "C" con un tamaño máximo de agregado de 19 mm. De este modo, se evaluaron 2 combinaciones granulométricas; la primera, para el diseño de mezclas por el método convencional y la segunda, para el diseño con el método Bailey. Cabe mencionar que ambos diseños

respetan la faja granulométrica solicitada por la ABC.

La composición granulométrica para su aplicación con el método convencional empleó la siguiente combinación: 35% del banco 3/4", 30% del banco 3/8" y 35% del banco de arena natural. En tanto, la segunda combinación granulométrica a aplicarse con el método Bailey presenta los siguientes porcentajes: 27% del banco 3/4", 45% del banco 3/8" y 28% del banco de arena natural. Ambas propuestas se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3

Gradación de la combinación granulométrica de los diseños establecidos

Tamiz	Abertura	Grad. densa Marshall + Bailey	Grad. densa Marshall	Gradación faja "C"		Tolerancia	Gradación faja "C" + Tolerancia	
				Inf.	Sup.		Inf.	Sup.
in	mm							
1"	25	100	100	100	100	±7	93	107
3/4"	19	100	100	97	100	±7	90	107
1/2"	12.5	86.7	82.7	76	88	±7	69	95
3/8"	9.5	76.8	69.9	68	80	±7	61	87
N.º 4	4.8	52.7	50.5	49	59	±5	44	64
N.º 8	2	36.6	35.7	36	45	±5	31	50
N.º 16	1.2	25.3	24.6	22.6	31	±5	17.6	36
N.º 30	0.6	18.2	17.4	17.1	25.3	±5	12.1	30.3
N.º 50	0.3	12.6	11.9	10.1	16.6	±5	5.1	21.6
N.º 100	0.2	7	6.6	5.4	10.2	±3	2.4	13.2
N.º 200	0.1	3.2	3	3	7	±2	1	9

Fuente: Autores

En la Figura 1 se muestra las distribuciones granulométricas empleadas para ambas combinaciones respecto a los límites de control de la faja granulométrica “C” establecida en la normativa nacional.

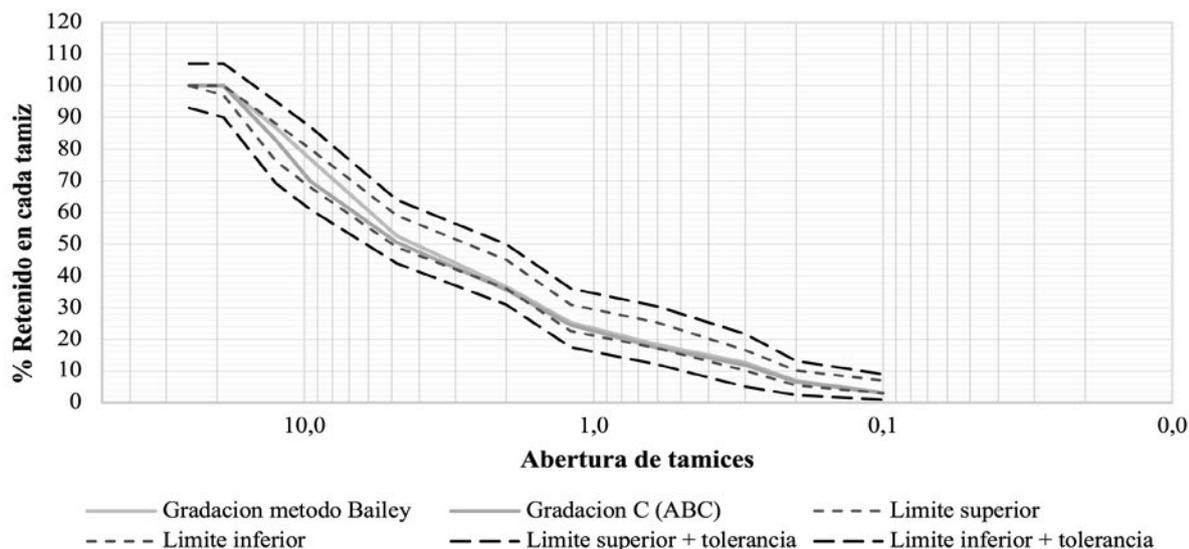


Figura 1. Curva granulométrica de las combinaciones propuestas.

2.4 Aplicación del método Bailey en el empaquetamiento del agregado

El método Bailey es un método de selección granulométrica que está directamente relacionado con las características de compactación de cada fracción de agregado, la selección estructural pétreo busca una mayor interacción de partículas de agregado de la mezcla. Este puede ser aplicado a otros tipos de dosificación de mezclas ya sea método Marshall, SUPERPAVE, Hveem etc. De esta forma, en el método Bailey los agregados gruesos se definen como partículas dispuestas en un determinado volumen, creando espacios que pueden ser ocupados por los agregados de menor tamaño los cuales se definen como agregados finos (Vavrik *et al*, 2002).

En el método Bailey el tamiz que establece la división entre agregado grueso y fino es llamado “tamiz de

control primario” PCS, que se basa en el tamaño máximo nominal NMAS de la mezcla, una vez determinada la gradación, esta se divide en tres partes donde cada una se evalúa individualmente: la parte gruesa desde el NMAS hasta el PCS, el agregado fino a su vez se divide en dos partes, tamiz de control secundario SCS y tamiz de control terciario TCS. El tamiz medio HS es definido como la apertura del tamiz más cerca a la mitad del NMAS.

Posteriormente se calcula la proporción de los agregados gruesos CA, proporción gruesa de los agregados finos FAc y la proporción fina de los agregados finos FAF, con los cuales se determina si la combinación de los agregados está dentro de los parámetros dados por el método Bailey. La Tabla 4 presenta los tamices de control con base en la combinación granulométrica de la faja “C”.

Tabla 4

Tamices de control del método Bailey

Descripción	Unidad	Abertura del tamiz
Tamaño máximo nominal NMAS	mm	12.50
Tamiz medio HS	mm	6.25
Tamiz de control primario PCS	mm	2.36
Tamiz de control secundario SCS	mm	0.60
Tamiz de control terciario TCS	mm	0.15

Fuente: Autores

La Tabla 5 muestra los tamices de control según la granulometría definida, que se determina por medio del ensayo granulométrico y según los porcentajes estipulados para lograr una dosificación que cumpla los límites granulométricos de la faja “C”.

Tabla 5

Porcentaje de los tamices de control según la granulometría definida

% Que pasa HS	60.29
% Que pasa PCS	36.58
% Que pasa SCS	18.20
% Que pasa TCS	7.02

Fuente: Autores

En la Tabla 6 se presenta las proporciones de los agregados para la mezcla cumpliendo los rangos establecidos por el método Bailey para un NMAS de 12.5 mm, donde los porcentajes establecidos cumplen los rangos propuestos por el método Bailey.

Tabla 6

Proporciones de los agregados en los rangos establecidos por el método Bailey

Rango de agregados gruesos	CA	0.50 a 0.65	0.60
Rango de agregado grueso fino	FAc	0.35 a 0.50	0.50
Rango agregado fino	FAf	0.35 a 0.50	0.39

Fuente: Autores

Aplicando el método Bailey se determinó una combinación granulométrica en la cual se establece porcentajes para cada fracción de agregado. Para el caso de la dosificación convencional se optó por una combinación granulométrica que se adapte a los límites de la faja “C”, en la Tabla 7 se especifica la proporción porcentual de cada banco de agregado y las combinaciones granulométricas Bailey y convencional.

Tabla 7

Porcentaje de combinación granulométrica por bancos

Combinación	% Para cada banco de agregado			Combinación al
	3/4"	3/8"	arena	
Combinación granulométrica Bailey	27%	45%	28%	100%
Combinación granulométrica convencional	35%	30%	35%	100%

Fuente: Autores

2.5 Evaluación de mezclas a la deformación permanente

El ensayo de rueda de Hamburgo permite evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente y daño por humedad en las mezclas asfálticas, usando especímenes de prueba sumergidos en agua, bajo la acción de una rueda de acero oscilante. Según la norma AASHTO (2004), las probetas elaboradas en laboratorio presentan dimensiones de 150 (mm) de diámetro y 62 (mm) de altura con una tolerancia de ± 2 (mm) para todas las medidas. Estos especímenes se elaboran en el compactador giratorio para alcanzar un índice de vacíos de 7 ± 1 . Posteriormente, para realizar el ensayo en la rueda de Hamburgo, son necesarias 4 probetas, que se disponen en los moldes de ensayo sumergidos en agua a una temperatura de 50°C. De esta forma, una rueda de acero de

203 mm de diámetro y 47 mm de espesor recorre la longitud de la muestra armada, la cual aplica una carga de 705 ± 4.5 N a una velocidad de 50 ± 5 pasadas por minuto hasta que se alcancen las 20000 pasadas o hasta que la muestra desarrolle 20 mm de deformación (AMAAC, 2011).

3. Resultados

3.1 Diseño de la mezcla asfáltica convencionales

El diseño de mezclas asfálticas convencional y Bailey se realizó mediante el método Marshall, conforme las especificaciones del Instituto del Asfalto (*Asphalt Mix Desing Methods*, 2014). La Tabla 8 presenta los resultados del diseño de las mezclas propuestas.

Tabla 8

Resultados obtenidos de los diseños de mezclas asfálticas

Parámetros volumétricos de la mezcla	Unidad	Limites		Diseño de mezclas asfálticas método Marshall			
		Min.	Máx.	60/70 Bailey	60/70 Convencional	85/100 Bailey	85/100 Convencional
Cemento asfáltico óptimo	%	---	---	6.2	5.4	5.4	5.2
Compactación por golpes	golpes	---	---	75	75	75	75
Estabilidad mínima	N	8006	---	13020.5	17656.3	14154.2	15323.3
Flujo	0.25 mm	8	16	15.6	13.7	11.3	14.4
Vacios con aire "VTM"	%	3	5	4%	4%	4%	4%
Vacios en el agregado mineral "VMA"	%	13	15	13.9	12.5	12.4	12.1
Vacios llenos de asfalto "VFA"	%	65	75	71.7	68.2	74.1	67.3
Densidad	g/cm ³	---	---	2324.8	2345.2	2384	2350.5

Fuente: Autores

3.2 Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente

La Tabla 9 muestra un resumen de los resultados obtenidos con el ensayo de rueda de Hamburgo, donde se observa el número de pasadas de fallo para cada diseño de mezcla asfáltica, al mismo tiempo se evalúa la falla por *stripping*.

Tabla 8

Resultado de la deformación permanente según número de pasadas y fallas por *stripping*

Diseño	Unidad	Especímenes de prueba	Deformación a las 10000 pasadas	Deformación a las 20000 pasadas	Falla por Stripping pasadas
Bailey 85/100	mm	Rueda 1	24.712	-	5934
		Rueda 2	22.560	-	5902
Convencional 85/100	mm	Rueda 1	20.456	-	6271
		Rueda 2	20.031	-	8229
Bailey 60/70	mm	Rueda 1	10.721	19.063	-
		Rueda 2	10.046	18.119	-
Convencional 60/70	mm	Rueda 1	8.171	18.976	9617
		Rueda 2	4.604	14.780	16750

Fuente: Autores

Conforme se observa en la Tabla 9, ninguno de los diseños de mezcla asfáltica propuestos, tanto la convencional como la diseñada con Bailey, cumplen con las 20000 pasadas solicitadas por el ensayo, evidenciando en este caso la influencia en la selección del tipo de ligante en la deformación permanente, ya que al ser el cemento asfáltico 85/100 menos consistente que el cemento asfáltico 60/70, este tenderá naturalmente a deformarse mismo se mejore en empaquetamiento del esqueleto pétreo. Este hecho debe ser tomado en cuenta por las plantas municipales de Cochabamba, ya que estos emplean el cemento asfáltico 85/100 para la construcción del pavimento flexible del municipio y tal como se evidencia en el ensayo de deformación, estos presentarán fallas tempranas por ahuellamiento.

Por otro lado, observando los diseños que emplean cemento asfáltico 60/70, se evidencia que este tipo de cemento asfáltico favorece a la disminución del ahuellamiento, comparado con el cemento asfáltico 85/100, ya que en estos es posible notar el aporte del empaquetamiento del agregado, debido a que la mezcla que aplica el método Bailey presenta una velocidad de deformación menor al no presentar punto de *stripping*.

Debido a que las mezclas elaboradas con cemento asfáltico 85/100 no llegaron a las 20000 pasadas, en la Figura 2 se realiza la comparación de los cuatro diseños propuestos a las 10000 pasadas.

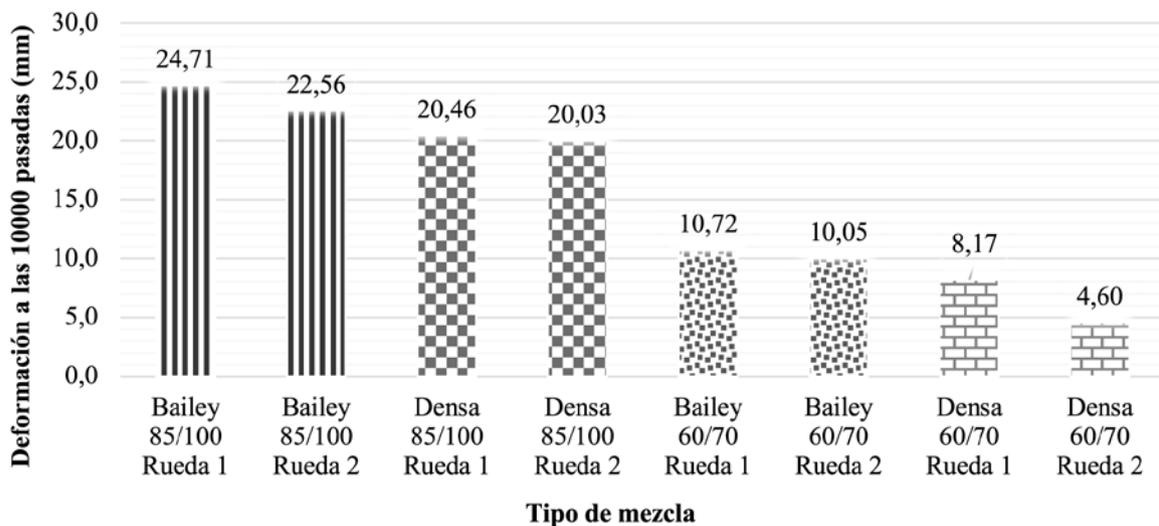


Figura 2. Deformación permanente de las mezclas asfálticas evaluadas.

Nótese en la Figura 2, al comparar los cuatro diseños propuestos, las mezclas elaboradas con asfalto 85/100 no cumplen con el requisito de deformación menor a los 20 mm incluso a las 10000 pasadas (mitad del ensayo de deformación), aspecto que debe ser considerado seriamente por las plantas de asfalto municipales del departamento de Cochabamba para un cambio de sus especificaciones.

4. Conclusiones

Tras las pruebas realizadas en el presente estudio se concluye que mismo ocupando el agregado pétreo entre el 90 al 95% del volumen de una mezcla

asfáltica, no es suficiente mejorar el empaquetamiento del mismo en vistas a un incremento de la resistencia a deformación permanente, si el diseño emplea un cemento asfáltico de poca consistencia, tal como se evidencia en los diseños elaborados con cemento asfáltico 85/100.

El método Bailey que evalúa el empaquetamiento del agregado contribuye a la disminución de la velocidad de deformación, aspecto que se evidencia en el diseño de la mezcla asfáltica 60/70 que aplica este método, ya que este no presenta falla por *stripping*, a diferencia de la mezcla asfáltica 60/70 diseñada por el método convencional.

5. Recomendaciones

Se recomienda a las plantas de asfalto municipales del departamento de Cochabamba cambiar el tipo de cemento asfáltico 85/100 a uno de mayor consistencia, debido a los altos niveles de ahuellamiento que este induce en el diseño de una mezcla asfáltica, en vistas a mejorar el desempeño del pavimento flexible de la ciudad.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos y a la fundación SWISSCONTACT por brindar los medios necesarios por los cuales fue posible ejecutar este proyecto.

6. Referencias bibliográficas

AASHTO. (2004). *AASHTO T 324: Standard Method of Test for Hamburg Wheel Tracking Testing of Compacted Hot Mix Asphalt*. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABC. (2011). *Manual de especificaciones técnicas de construcción*. Bolivia: Administradora Boliviana de Carreteras.

AMAAC. (2011). *Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera con el analizador de rueda cargada de Hamburgo (HWT), en una mezcla asfáltica compactada*. Mexico: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.

Asphalt Mix Design Methods. (2014). *Asphalt Mix Design Methods* (Vol. Seventh Edition). USA.

ASTM D4867/ D4867M. (2004). *metodo de prueba estandar para efecto de la humedad en mezclas de pavimento de hormigon asfaltico*.

Rondon Quintana H. A. , Reyes Lizcano F. A. (2015). *PAVIMENTOS: Materiales, Construccion y Diseño*. Bogotá: Macro.

Invias. (2013). *Especificaciones generales de construccion de carreteras*. Colombia.

Maldonado, D. A. (2018). *Influencia del Empaquetamiento de los Agregados sobre la Resistencia a la Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas*. Popayán: Universidad del Cauca.

Garnica Anguas P., Delgado Alamilla H., Sandoval Sandoval C. D. (2005). *Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas*. Querétaro: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Vavrik, W., Huber, G., Pine, W., & Carpenter, S. (Octubre de 2002). Metodo Bailey para la seleccion de granulometrias para el diseño de mezclas en caliente. *TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR*.

Estructura del ensamblaje de microcrustáceos en tres distritos biogeográficos de los Andes de Bolivia

Francisca Acosta¹, Ximena Aguilera, Melina Campero¹, Pablo Prado¹, Carla E. Fernández^{1,*}

¹Unidad de Limnología Recursos Acuáticos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*carlaelo.fernandez@gmail.com

Resumen

La estructura de los ensamblajes de microcrustáceos de zonas altas en los Andes, es poco conocida. En este trabajo, describimos la composición y riqueza del ensamblaje de microcrustáceos zooplanctónicos (es decir, la estructura del ensamblaje) de 27 lagunas altoandinas, distribuidas en tres distritos biogeográficos de la Cordillera Oriental de Bolivia: Titicaca y Cordillera Real (La Paz), Tunari (Cochabamba) y Los Frailes (Potosí). Las muestras biológicas fueron obtenidas en cada laguna, según la metodología limnológica convencional y se identificaron un total de 34 especies de microcrustáceos (copépodos y cladóceros). Las especies de los géneros *Boeckella* y *Daphnia* fueron características, con dos especies endémicas de la región altoandina, *D. peruviana* y *B. titicacae*. Las lagunas de los distritos de La Paz y Cochabamba mostraron un ensamblaje de microcrustáceos similar al de las lagunas del distrito de Potosí. La abundancia y riqueza no mostró diferencias significativas entre los sectores estudiados, sin embargo, existe una tendencia a ser mayor en las lagunas del distrito de Potosí. En Bolivia aún quedan zonas poco exploradas y se sabe que pocas especies del zooplancton son realmente cosmopolitas, lo cual refuerza la necesidad de mayores estudios regionales detallados, ya que estudios apoyan la existencia de endemismos no descritos en los Andes de Sudamérica.

Palabras clave: *Zooplankton, Copépodos, Cladóceros, Boeckella, Daphnia, Lagos andinos, Bolivia, Endemismo.*

Abstract

We describe the composition and richness of zooplanktonic microcrustaceans of 27 high Andean lakes, distributed in three districts of the Eastern Cordillera of Bolivia (La Paz, Cochabamba, Potosí). Biological samples were obtained following standard limnological methodology, and a total of 34 species of microcrustaceans (copepods and cladocerans) were identified. The species of genera *Boeckella* and *Daphnia* were characteristic, with two endemic species to the high Andean region, *D. peruviana* and *B. titicacae*. The lakes of La Paz and Cochabamba showed a similar assemblage of zooplanktonic microcrustaceans, with respect to the lakes of Potosí district. The relative abundance and richness did not show significant differences between the studied districts, however, there is a tendency to be higher in lakes of Potosí. The knowledge about zooplankton species and its distribution is still lacking in Bolivia, and it is known that few zooplankton species are truly cosmopolitan, which reinforces the need for more detailed regional studies, since other studies support the existence of undescribed endemism in the Central Andes of South America.

Key words: *Zooplankton, Copepods, Cladocerans, Boeckella, Daphnia, Andean lakes, Bolivia.*

1. Introducción

Las características de la zona tropical varían ampliamente en relación con la altitud. Variables ambientales como la temperatura (que disminuye 6.5 °C por cada 1000 m ascendidos), o la presión (que disminuye aproximadamente 1.2 kPa por cada 100 m ascendidos) son fundamentales para el desarrollo

biológico de los organismos, y por lo general, los ecosistemas de montaña a altitudes elevadas son considerados sistemas extremos. En este sentido, la región Altoandina de Bolivia se caracteriza por poseer una compleja fisiografía, con elevaciones por encima de los 4800 msnm y por la presencia de numerosos lagos y lagunas de origen glaciar o tectónico (Navarro & Maldonado, 2004). De éstos, el lago Titicaca es

sin duda el que ha recibido mayor atención por su tamaño y características particulares, sin embargo, las numerosas lagunas, ya sean someras o profundas, son las que dominan el paisaje altoandino (Maldonado et al., 2011).

A pesar de que las lagunas de altura son consideradas menos diversas que los cuerpos de agua de tierras bajas (Green, 1995), se reconoce que zonas como los Andes en Sud-América han sido escasamente explorados, tanto en su zona pelágica como litoral, y son a la vez considerados como un importante centro de biodiversidad (hotspot) con alto grado de endemismo (Coronel, Declerck, & Brendonck, 2007; Kotov, Sinev, & Berrios, 2010; Mergeay et al., 2008; Myers, Mittermeier, Mittermeier, da Fonseca, & Kent, 2000). Los organismos acuáticos que viven en estos ecosistemas están sujetos a condiciones ambientales extremas, como baja presión de oxígeno, baja temperatura y altos niveles de radiación ultravioleta (Cabrol et al., 2014; Jacobsen & Dangles, 2017; Madsen et al., 2015; Quenta et al., 2016), las que actúan como filtros estructurando las comunidades de vertebrados e invertebrados, como los microcrustáceos zooplanctónicos.

Debido a su corto ciclo de vida, el zooplancton es capaz de responder rápidamente a los cambios ambientales y, por lo tanto, la composición de especies en la comunidad es un indicador de las características de los ecosistemas de los que proceden (Suárez-Morales & Gasca, 1996). Por otra parte, el zooplancton, como principal eslabón entre el fitoplancton (productores primarios) y los consumidores secundarios, posee una posición e importancia central en las redes tróficas. Sin embargo, aún se desconoce qué especies predominan en las lagunas altoandinas de Bolivia, ya que la mayor parte de los estudios zooplanctónicos en América del Sur, se han realizado principalmente en zonas templadas.

Algunos trabajos locales han sido pioneros en el estudio de la diversidad de zooplancton en Bolivia, específicamente en el lago Titicaca del departamento de La Paz (Rey 1991, Pinto, 1991), bajo gradiente altitudinal y bioclimático (Acosta, Cadima, & Maldonado, 2003), en lagunas del distrito de La Paz (Román & del Castillo, 1999; Segers, Meneses, & del Castillo, 1994) y en lagunas de la Cordillera del Tunari en Cochabamba (Aguilera, Crespo, Declerck, & de Meester, 2006; Aguilera, Declerck, de Meester,

Maldonado, & Ollevier, 2006; Aguilera, Mergeay, Wollebrants, Declerck, & Meester, 2007; Mergeay et al., 2008). Sin embargo, aún tomando en cuenta todos estos trabajos, se puede decir que el conocimiento sobre la diversidad y distribución geográfica de los microcrustáceos zooplanctónicos de la zona Altoandina de Bolivia es incipiente.

En este sentido y tomando en cuenta la relevancia de generar conocimiento sobre estos ecosistemas y el ensamblaje zooplanctónico, el objetivo de este trabajo es proporcionar información sobre la composición, abundancia relativa y riqueza de microcrustáceos zooplanctónicos (cladóceros y copépodos) de 27 lagunas distribuidas en los distritos biogeográficos del Titicaca y Cordillera Real en La Paz (de ahora en adelante denominado distrito de La Paz), Tunari (de ahora en adelante denominado distrito de Cochabamba) y Los Frailes (de ahora en adelante denominado distrito de Potosí) de los altos Andes bolivianos, así como patrones de similitud en el ensamblaje de cada zona.

2. Métodos

Área de estudio

Las lagunas estudiadas se encuentran ubicadas en los Andes de Bolivia a lo largo de la Cordillera Oriental de Bolivia (Fig. 1). Las lagunas de La Paz, corresponden al distrito Biogeográfico del Titicaca y Cordillera Real, cuyas rocas predominantes son del silúrico y devónico (areniscas, cuarcitas, lutitas, limolitas y diamictitas), con algunos importantes afloramientos de plutones graníticos, las altitudes máximas superan los 6.000 m.s.n.m. Por otro lado, las lagunas de Cochabamba corresponden al distrito Biogeográfico del Tunari, cuyos materiales predominantes son del ordovícico (areniscas, cuarcitas y lutitas) y no muestra afloramientos graníticos, las altitudes máximas están alrededor de 5.000 m.s.n.m. Finalmente, las lagunas de Potosí, pertenecen al distrito Biogeográfico de Los Frailes, que corresponde a la faja paleozoica que presenta rocas sedimentarias antiguas más o menos metamorizadas (cuarcita, areniscas, esquistos, filitas y lutitas) y que además está interrumpida por varios importantes afloramientos volcánicos.

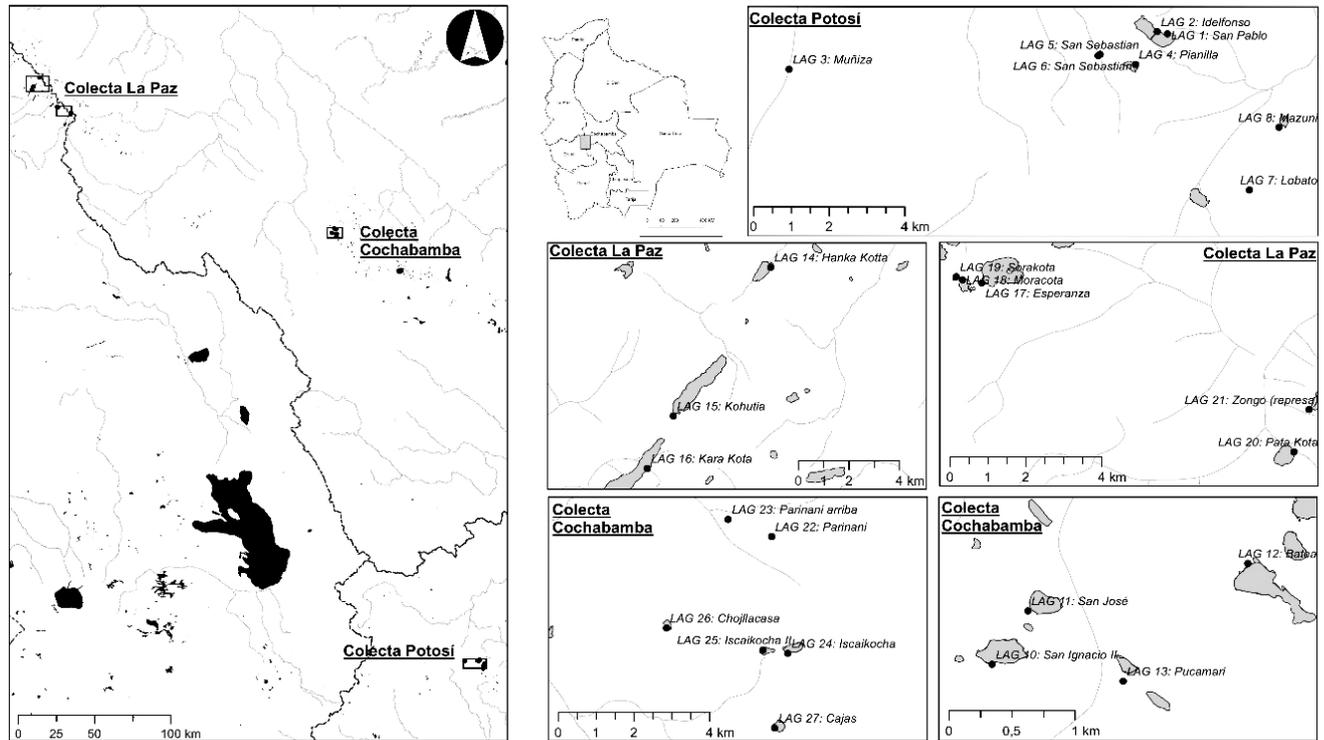


Figura 1. Sitios de muestreo en tres distritos de la cordillera andina de Bolivia.

Muestreo

Realizamos muestreos de 27 lagunas (Fig. 1, Tabla 1) ubicadas sobre los 4.200 m de altitud en los tres distritos biogeográficos anteriormente mencionados, entre febrero y abril del 2010. Se tomaron muestras de zooplancton tanto del litoral (muestra cualitativa) como de la zona pelágica (muestra cuantitativa) de las lagunas. Las muestras cualitativas se tomaron por unidad de esfuerzo (3 lanzamientos) en la zona litoral de cada laguna a través de una red de arrastre de 50 µm de abertura de poro. En la zona pelágica se tomaron muestras cuantitativas por medio de una trampa de Schindler (10 L) a diferentes profundidades con fin de capturar muestras representativas de la diversidad existente. Debido a que el objeto del presente estudio es sólo la descripción de la composición del zooplancton en las diferentes lagunas altoandinas, se integraron las dos muestras durante el análisis de datos para la obtención de abundancias relativas del zooplancton. Las muestras fueron fijadas con formol azucarado (4 %, concentración final) y conservadas para su posterior análisis en laboratorio.

Tabla 1

Ubicación geográfica de las lagunas estudiadas

Distrito	Nombre laguna	Código	Latitud	Longitud
La Paz	Hanka Kotta	LAG 14	16°04'31,7"	68°18'57,3"
	Kohutia	LAG 15	16°07'47"	68°21'02"
	Kara Kota	LAG 16	16°08'56,3"	68°21'35,2"
	Esperanza	LAG 17	16°15'21"	68°12'18,4"
	Moracota	LAG 18	16°15'18,1"	68°12'34,9"
	Sorakota	LAG 19	16°15'15,4"	68°12'40"
	Pata Kota	LAG 20	16°17'49,2"	68°07'51,2"
Cochabamba	Zongo (represa)	LAG 21	16°17'12"	68°07'38,3"
	Parinani	LAG 22	16°59'40,6"	66°33'47,2"
	Parinani arriba	LAG 23	16°59'25,5"	66°34'24,3"
	Iscaikocha	LAG 24	17°01'23"	66°33'33,3"
	Iscaikocha II	LAG 25	17°01'20"	66°35'54,5"
	Chojllacasa	LAG 26	17°01'01"	66°35'17,1"
	Cajas	LAG 27	17°02'28,6"	66°33'44,6"
	San Ignacio II	LAG 10	17°14'59,6"	66°11'43,6"
	San José	LAG 11	17°14'45,5"	66°11'34,4"
	Batea	LAG 12	17°14'33"	66°10'38"
Potosí	Pucamari	LAG 13	17°15'04"	66°11'10"
	San Pablo	LAG 1	19°36'13,4"	65°42'48,3"
	Idelfonso	LAG 2	19°36'11,5"	65°42'57,2"
	Muñiza	LAG 3	19°36'44,6"	65°48'12"
	Pianilla	LAG 4	19°36'40,2"	65°43'15,8"
	San Sebastian	LAG 5	19°36'31,5"	65°43'46"
	San Sebastian I	LAG 6	19°36'32,4"	65°43'47,7"
	Lobato	LAG 7	19°38'30,4"	65°41'38,2"
	Mazuni	LAG 8	19°37'35,4"	65°41'12,9"
Challviri	LAG 9	19°39'27,2"	65°41'43,1"	

Las muestras de zooplancton litoral fueron identificadas y cuantificadas (abundancia relativa). Para la obtención de la abundancia relativa, se consideró un mínimo de 300 organismos de la especie dominante, mientras que las muestras pelágicas fueron contadas en su totalidad. Ambos tipos de muestras se contaron en cámaras de conteo abiertas de 5 ml de capacidad, bajo estereomicroscopio Olympus, a 5X de aumento.

Se realizó un análisis de agrupamiento de los datos de presencia/ausencia de las especies de microcrustáceos en base al porcentaje de similitud de Bray Curtis, con el fin de detectar patrones de relación entre las lagunas relacionadas de los distritos estudiados. El análisis fue realizado en el programa Primer 5.0.

3. Resultados

Frecuencia de aparición de microcrustáceos

Se identificaron un total de 34 de especies de microcrustáceos entre los tres distritos estudiados (Tabla 2); 13 especies de copépodos y 21 de cladóceros. En el grupo de los copépodos 6 especies pertenecieron a la familia Centropagidae, 6 a la familia Cyclopidae y una al orden Harpacticoidea. En cuanto a los cladóceros, 7 especies pertenecieron a la familia Daphnidae, una a la familia Bosminidae, una a la familia Macrothricidae, una a la familia Iliocryptidae y 11 a la familia Chydoridae.

De las 34 especies identificadas, 12 especies (35 %) fueron comunes en los distritos estudiados de La Paz, Cochabamba y Potosí, 5 especies (15 %) solo estuvieron presentes en los distritos de Cochabamba y Potosí, 3 especies (9 %) solo presentes en los distritos de La Paz y Cochabamba y 1 especie (3 %) presente en los distritos de La Paz y Potosí. Adicionalmente, también se observaron especies de

distribución restringida a cada región. En el distrito de Cochabamba se encontraron 5 especies (15 %) de cladóceros en la zona litoral de las lagunas de solo en esta región, estos pertenecieron a la familia Chydoridae (*Paralona piagra*, *Ephemeroporus* sp., *Graptoleberis* af *testudinaria* y *Chydorus* sp.) y a la familia Iliocryptidae (*Iliocryptus* sp.). Por otro lado, en el distrito de Potosí se encontraron 7 especies (20 %) de microcrustáceos restringidos a esta región, tres pertenecientes a la familia Centropagidae (*Boeckella calcaris*, *Boeckella palustris* y *Neoboeckella* cf.

Tabla 2

Frecuencia de aparición (en porcentaje) de las especies en las lagunas de los diferentes distritos estudiados

Familia	Especie	La Paz (%)	Cochabamba (%)	Potosí (%)
COPEPODOS				
Centropagidae	<i>Boeckella titicacae</i>		40	100
	<i>B. gracilis</i>		20	55.5
	<i>B. calcanis</i>			11.1
	<i>B. occidentalis</i>	100	30	
	<i>B. palustris</i>			44.4
	<i>Neoboeckella</i> sp.			33.3
Cyclopidae	<i>Microcyclops</i> sp.			44.4
	<i>Metacyclops leptopus</i>	75	30	66.6
	<i>Mesocyclops meridianus</i>	12.5		
	<i>Eucyclops ensiffer</i>	37.5	10	33.3
	<i>E. cf. leptacanthus</i>		50	22.2
	<i>Tropocyclops prasinus</i>	12.5	100	
	Harpacticoide	62.5	40	33.3
CLADOCEROS				
Daphnidae	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	50	60	88.8
	<i>C. sp.</i>	25	10	
	<i>Daphnia</i> (complejo) <i>pulex-pulicaria</i>	87.5	90	77.7
	<i>D. peruviana</i>		10	33.3
	<i>D. (Ctenodaphnia) sp.</i>			55.5
	<i>D. (Ctenodaphnia) sp. 2</i>			77.7
	<i>Simocephalus cf. vetulus</i>	12.5		44.4
	<i>Bosmina huaronensis</i>	12.5	50	22.2
Bosminidae	<i>Macrothrix</i> sp.	25	10	44.4
Macrothricidae	<i>Iliocryptus</i> sp.		20	
Iliocryptidae	<i>Alona assiani</i>	37.8	40	11.1
Chydoridae	<i>A. davidi</i>	12.5	10	22.2
	<i>A. cambouei</i>			11.1
	<i>Alonella excisa</i>	50	20	33.3
	<i>Chydorus</i> sp.		10	
	<i>C. brevilabris</i>	62.5	60	44.4
	<i>Pleuroxus aduncus</i>			33.3
	<i>Paralona piagra</i>		40	
	<i>Ephemerophorus</i> sp.		20	
	<i>Graptoleberis testudinaria</i>		10	
	<i>Camptocercus</i> sp.	25	60	11.1

loffleri), un Cyclopidae (*Microcyclops* sp.), un Chydoridae (*Pleuroxus aduncus*) y dos dáfidos del género *Daphnia* (*Ctenodaphnia*) sp., que fueron separados por su diferencia morfológica (presencia o ausencia de yelmo), pero que podría tratarse de una sola especie, lo cual debe ser corroborado por análisis genético. Finalmente, las especies con mayor frecuencia de aparición en las lagunas del distrito de La Paz, fueron *Boeckella occidentalis* (100% de las lagunas) y el complejo *Daphnia pulex* (90% de las lagunas). En Cochabamba, las especies que presentaron mayor frecuencia de aparición en las lagunas de esta región fueron *Tropocyclops prasinus* (100% de las lagunas) y el complejo *Daphnia pulex* (90 % de las lagunas). Por último, las especies que presentaron mayor frecuencia de aparición en la región de Potosí fueron, *Boeckella titicacae* (100 % de las lagunas) y *Ceriodaphnia dubia* (89 % de las lagunas) (Tabla 2).

Características de las lagunas del distrito de La Paz

Las lagunas estudiadas en el distrito de La Paz, se encontraron entre los 4.376 y 4.753 m s.n.m. En total, se identificaron un total de 17 especies de

microcrustáceos. Seis especies pertenecieron al grupo de copépodos, una de ellas correspondió a la familia Centropagidae (*Boeckella occidentalis*), cuatro a la familia Cyclopidae (*Metacyclops leptopus*, *Mesocyclops meridianus*, *Eucyclops ensifer* y *Tropocyclopos prasinus*) y una especie de copépodo del orden Harpacticoida. Once especies pertenecieron al grupo de los cladóceros, cuatro especies correspondieron a la Familia Daphnidae (*Daphnia* complejo *pulex*, *Ceriodaphnia dubia*, *Ceriodaphnia* sp y *Simocephalus* af. *mixtus*), una a la familia Bosminidae (*Bosmina* sp), una a Macrothricidae (*Macrotrix* sp) y seis a la familia Chydoridae (*Alona ossiani*, *A. davidi*, *Alonella excisa*, *Chydorus brevilabris*, *Camptocercus* sp.).

En todas las lagunas dominó el grupo de los copépodos (Fig. 2), siendo *Boeckella occidentalis* la que presentó mayor abundancia relativa. Algunas lagunas mostraron una alta abundancia relativa de cladóceros, por ejemplo, L16 (Kara Kotta) con el complejo *Daphnia pulex* (70%) y en la laguna L20 (Pata Kota) con la especie *Chydorus brevilabris* (64%), pero sin llegar a sobrepasar la abundancia de copépodos (Tabla 3).

Tabla 3

Características y abundancia relativa de microcrustáceos de las lagunas muestreadas

Parámetros	N	Mediana	Mínimo	25%	75%	Máximo
La Paz n=8						
Altitud (msnm)	8	4608,0	4376,0	4530,5	4693,5	4753,0
Copépodos (%)	8	91,68	100,00	94,88	81,13	78,61
Cladóceros (%)	8	8,32	0,00	5,12	18,87	21,39
Cochabamba n=10						
Altitud (msnm)	10	4348,0	4276,0	4300,0	4367,0	4463,0
Copépodos (%)	10	46,05	0,00	43,40	53,05	71,41
Cladóceros (%)	10	53,95	100,00	56,60	46,95	28,59
Potosí n=9						
Altitud (msnm)	9	4358,0	4287,0	4325,0	4428,0	4581,0
Copépodos (%)	9	89,44	96,23	81,10	84,22	84,12
Cladóceros (%)	9	10,56	3,77	18,90	15,78	15,88

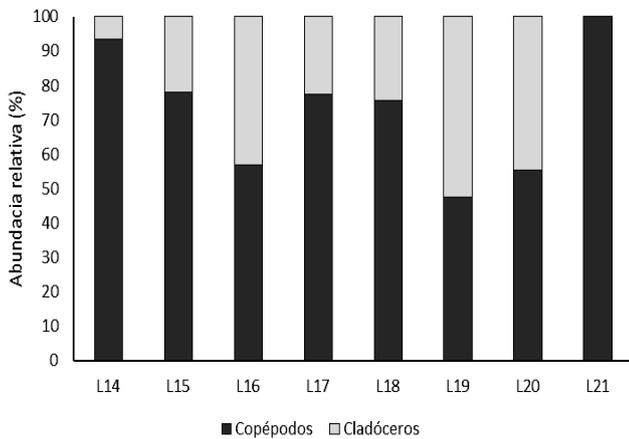


Figura 2. Composición porcentual (abundancia relativa) de microcrustáceos en el distrito de La Paz.

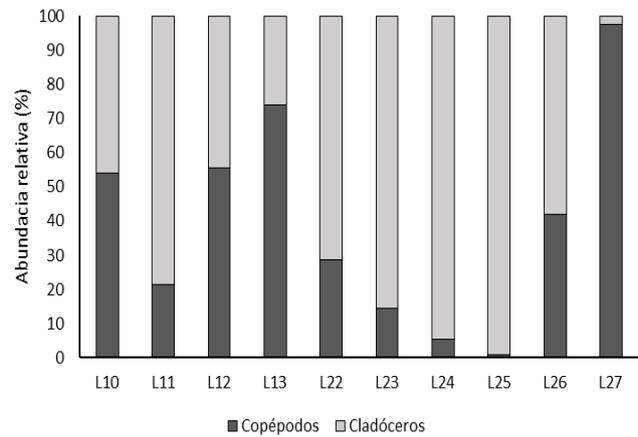


Figura 3. Composición porcentual (abundancia relativa) de microcrustáceos en el distrito de Cochabamba.

Características de las lagunas del distrito de Cochabamba

La altitud de las lagunas estudiadas en el distrito de Cochabamba, estuvieron comprendidas entre los 4.276 y 4.463 m s.n.m (Tabla 3). Se capturó un total de 25 especies de microcrustáceos, de los cuales ocho especies correspondieron al grupo de los copépodos. De estas especies, tres de ellas pertenecían a la familia Centropagidae (*Boeckella titicacae*, *B. gracilis*, *B. occidentalis*), cuatro a la familia Cyclopidae (*Metacyclops leptopus*, *Eucyclops ensifer*, *E. cf. leptacanthus*, *Tropocyclops prasinus*) y una especie perteneció al orden Harpacticoidea. Dieciséis especies correspondieron al grupo de los cladóceros, cuatro pertenecieron a la familia Daphnidae (*Daphnia* complejo *pulex*, *D. peruviana*, *Ceriodaphnia dubia*, *Ceriodaphnia* sp.), una a la familia Bosminidae (*Bosmina* sp.), una a la familia Macrotrichidae (*Macrotrix* sp.), una a la familia Ilyocryptidae (*Ilyocryptus* sp.) y diez a la familia Chydoridae (*Alona ossiani*, *A. davidi*, *A. cambouei*, *Alonella excisa*, *Chydorus* sp., *C. brevilabris*, *Paralona piagra*, *Ephemerophorus* sp., *Graptoleberis testudinaria*, *Camptocercus* sp.).

Gran parte de las lagunas fue dominada por el grupo de los cladóceros (Fig. 3), siendo el complejo *Daphnia pulex* o *Bosmina* sp., las especies que presentaron la mayor abundancia relativa; algunas lagunas de esta región presentaron mayor abundancia relativa de copépodos, como por ejemplo L13 con *Boeckella titicacae* (80 %) y L26 - L27 con *Tropocyclops prasinus* (58 y 89%, respectivamente).

Características de las lagunas del distrito de Potosí

La altitud de las lagunas estudiadas en el distrito de Potosí, se encontraron entre los 4.287 y 4.581 m s.n.m. (Tabla 3). Se identificaron un total de 25 especies de microcrustáceos, tomando en cuenta las zonas pelágica y litoral de cada laguna. Diez especies correspondientes al grupo Copepoda, de los cuales cinco pertenecieron a la familia Centropagidae (*Boeckella titicacae*, *B. gracilis*, *B. calcaris*, *B. palustris*, *Neoboeckella* cf. *loffleri*), cuatro a la familia Cyclopidae (*Microcyclops* sp., *Metacyclops leptopus*, *Eucyclops ensifer*, *Eucyclops* cf. *leptacanthus*), y una especie correspondiente al orden Harpacticoidea. Quince especies correspondieron al grupo de los cladóceros, de los cuales seis pertenecieron a la familia Daphnidae (*Daphnia* complejo *pulex*, *D. peruviana*, *D. (Ctenodaphnia)* sp. yelmo, *Daphnia (Ctenodaphnia)* sp., *Ceriodaphnia dubia*, *Simocephalus mixtus*), una a la familia Bosminidae (*Bosmina* sp.), una a la familia Macrotrichidae (*Macrotrix* sp.) y siete a la familia Chydoridae (*Alona ossiani*, *A. davidi*, *A. cambouei*, *Alonella excisa*, *Chydorus brevilabris*, *Pleuroxus aduncus*, *Camptocercus* sp.).

La mayor parte de las lagunas de esta región estuvo dominada por el grupo de los copépodos (Fig. 4), siendo *Boeckella titicacae* la especie que presentó la mayor abundancia relativa, en algunos casos acompañada con *B. palustris* o *B. gracilis*; algunas lagunas de esta región mostraron dominancia de cladóceros en la zona litoral; por ejemplo L1 (laguna San Pablo) con *Ceriodaphnia dubia* (53%) junto a *Daphnia peruviana* (13%), L4 (laguna Pianilla)

con *Ceriodaphnia dubia* (33%) junto a *Daphnia* (*Ctenodaphnia*) sp (36%), L7 (laguna Lobato) con *Ceriodaphnia dubia* (79%).

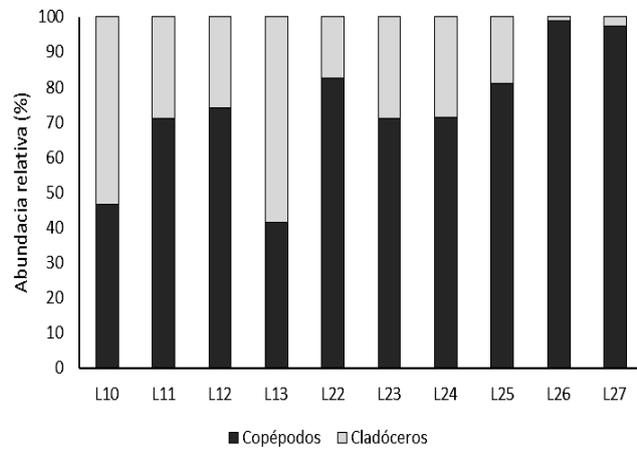


Figura 4. Composición porcentual (abundancia relativa) de microcrustáceos en el distrito de Potosí.

Análisis comparativo de los tres distritos

El análisis realizado en base a una matriz de similitud de Bray Curtis a partir de la densidad de especies de microcrustáceos de todas las lagunas, reconoce 3 conjuntos de lagunas a una similitud del 30 % (Fig. 6). El grupo 1 incluye a todas las lagunas del distrito de Potosí, el grupo 2 al conjunto de lagunas del distrito de La Paz, mientras que el grupo 3 representa a las

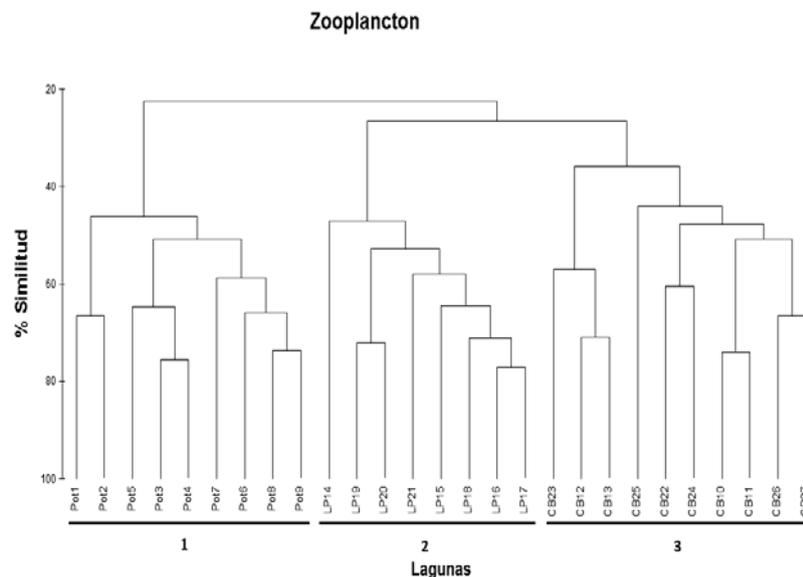


Figura 5. Dendrograma basado en el análisis de similitud de las densidades de las especies de microcrustáceos zooplanctónicos; grupo 1 = distrito Potosí, grupo 2 = distrito La Paz, grupo 3 = distrito Cochabamba.

lagunas del distrito de Cochabamba. Los grupos de lagunas de La Paz y Cochabamba mostraron una mayor similitud (25%) en el ensamblaje de los microcrustáceos zooplanctónicos, respecto a las lagunas del distrito de Potosí.

Pese a que las lagunas de Potosí mostraron una tendencia a una mayor riqueza específica tanto de copépodos como de cladóceros, no se pudo evidenciar diferencias significativas en el número de especies de microcrustáceos registradas en las lagunas de las tres localidades (Fig. 6).

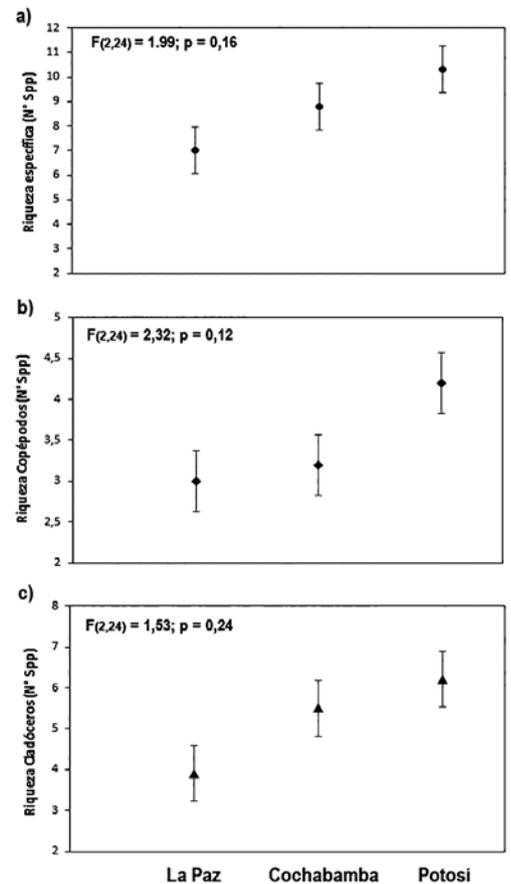


Figura 6. Número total de especies de microcrustáceos zooplanctónicos (a), copépodos (b) y de cladóceros (c) presentes en las lagunas de los tres distritos estudiadas. Las barras indican la desviación estándar.

4. Discusión

Se identificaron un total de 34 especies de microcrustáceos (13 especies de copépodos y 21 especies de cladóceros) entre los distritos biogeográficos estudiados. Las condiciones ambientales en este tipo de lagos (lagos oligotróficos de baja mineralización, elevadas altitudes, baja presión de oxígeno, etc.) hace que los mismos tiendan a presentar baja riqueza y baja biomasa zooplanctónica (De los Ríos & Soto, 2009). Algunas de las especies halladas han sido anteriormente citadas en trabajos puntuales en lagunas de La Paz (Pinto, 1991; Román & del Castillo, 1999) y Cochabamba (Acosta et al., 2003; Aguilera, Crespo, et al., 2006; Coronel et al., 2007), siendo a nuestro conocimiento el primer estudio que reporta una lista de especies de zooplancton para el distrito biogeográfico de Los Frailes de Potosí.

Las lagunas del distrito de La Paz, caracterizadas por su mayor profundidad, mostraron valores más bajos en abundancia y número de especies que los otros dos distritos, sin embargo, las lagunas estudiadas no presentaron diferencias significativas respecto a la abundancia relativa y la riqueza específica de microcrustáceos zooplanctónicos por sectores ($p > 0.05$; Figs. 5 y 7). Pese a ello, se puede observar cierto nivel de agrupamiento (análisis de similitud de Bray Curtis; Fig. 6) que parece coincidir con las características biogeográficas de la región. Las lagunas de los distritos de La Paz y Cochabamba se encuentran en la fracción Central de la cordillera Real; ambos grupos mostraron una similitud de 25% y desde el punto de vista biogeográfico, ambos tramos de la cordillera corresponden a la Puna Mesofítica de bioclima pluviestacional húmedo a subhúmedo (Maldonado et al., 2011). Mientras el conjunto de lagunas del distrito de Potosí, con menor similitud hacia los otros dos tramos, corresponden a la fracción de la cordillera Oriental Meridional (Cordillera de los Frailes) perteneciente a la Puna Xerofítica, con un bioclima xérico por debajo a los 4.000 m s.n.m., y pluviestacional subhúmedo en altitudes superiores.

En relación a las especies de microcrustáceos registrados en el presente trabajo, los boeckellidos (copépodos Centropidae) son sin duda el sello característico de los ambientes altoandinos de Bolivia y se encuentran ampliamente distribuidos en zonas de montaña de Sudamérica (Acosta et al., 2003; Maldonado et al., 2011). Para América del Sur se

reconocen 14 especies del género *Boeckella* (Bayly, 1992), de las cuales 7 han sido registradas en Bolivia y de estas 5 fueron encontradas en el presente trabajo. De las otras dos especies, *B. poopoensis* se presenta en ambientes salinos (Bayly, 1992; Maldonado et al., 2011) y *B. meteoris* sólo ha sido citada para Bolivia por Bayly (1992), hacia el sur de Potosí, área no contemplada en el presente estudio.

Del total de cinco especies que registramos para el género *Boeckella*, sólo *B. occidentalis* fue detectada en las lagunas del distrito de La Paz y algunas lagunas de Cochabamba. Esta especie es típica de lagos de gran altura, con una distribución que abarca desde el norte de Chile, Bolivia, Perú, Ecuador hasta Colombia (Silvina Menu-Marque, Morrone, & Locascio de Mitrovich, 2000). *Boeckella gracilis* se encontró presente tanto en lagunas de los distritos de Cochabamba y Potosí. Esta especie es la que se encuentra más ampliamente distribuida en Sudamérica, se extiende desde el sur de la Patagonia y distrito de los lagos chilenos y avanza hacia el este pampeano donde se encuentra muy bien representada, y hacia el norte central de la Argentina, Bolivia, Perú y Ecuador hasta alcanzar Colombia, la latitud más septentrional para este género (Silvina Menu-Marque et al., 2000). *B. palustris* y *B. calcaris* son dos especies muy relacionadas y comparten similar distribución, estuvieron presentes en las lagunas de Potosí, sin embargo, también reportadas anteriormente en lagunas de Cochabamba (Aguilera, Crespo, et al., 2006), estas dos especies se encuentran distribuidas en lagos y lagunas de alta montaña del norte de la Argentina, oeste de Bolivia y sur del Perú (Silvina Menu-Marque et al., 2000).

Un caso especial lo constituye la especie *B. titicacae*, descrita para el lago Titicaca, que muestra escasos rasgos morfológicos disímiles con *B. gracilipes*, llevando muchas veces a confusiones al momento de la determinación específica. Algunos autores consideran a la especie del lago Titicaca como una subespecie de *B. gracilipes* (*B. gracilipes titicacaensis*; (Thomasson, 1959), mientras que otros investigadores (S Menu-Marque & Locascio de Mitrovich, 1998; Silvina Menu-Marque et al., 2000) han considerado a *B. titicacae* como un sinónimo de *B. gracilipes*. Sin embargo, Scheihing et al. (2010) demostraron a través de análisis multivariado morfológico y a través del enfoque filogenético molecular, que la especie que habita el Altiplano (Plateau) Andino corresponde a *B. titicacae* y no a *B. gracilipes*. La reconstrucción

filogenética de la familia Centropagidae de Sudamérica, indicó que *B. gracilipes* representa un taxón hermano y de posterior aparición a *B. titicacae*. El resultado del estudio de Scheihing et al. (2010), lleva a cuestionar la amplia distribución biogeográfica y altitudinal de *B. gracilipes*. En todo caso, en Bolivia no se han dado reportes de *B. gracilipes*, siendo *B. titicacae* la especie mayormente registrada en sus lagunas altoandinas.

Otra especie de la familia Centropagidae, detectada sólo en 3 lagunas someras (profundidad entre 4 y 6 m) situadas a una altura entre 4.428 y 4.358 m s.n.m. del distrito de Potosí (LAG 1, LAG 2, LAG 3; ver Tabla 1) fue *Neoboeckella* sp. El género *Neoboeckella* al parecer tiene únicamente dos especies, *N. kinzeli* (Löffler) colectada en Perú y *N. loffleri* en Bolivia (Bayly, 1992). En este sentido la especie colectada puede tratarse de *N. loffleri* (por confirmar) descrita por Bayly (1992), quien recolectó el organismo en un cuerpo de agua somero (hacienda Huacaroma; profundidad 20 cm) situado en el Departamento de Oruro, Bolivia (17°40' S, 67°30' W, a 3.720 m s.n.m.).

Entre los cladóceros, el género *Daphnia* es el que ha recibido mayor atención, por las investigaciones realizadas en el área de la ecología y la evolución. En el presente estudio se detectó 3-4 especies diferentes del género *Daphnia*, considerando a una de ellas perteneciente a un linaje que se incluye en el complejo de *D. pulex* muy cercano a grupos de *D. tenebrosa* y *D. pulicaria*, endémica de sudamérica. Los análisis genéticos demuestran que este linaje se considera un ancestro del grupo de *D. pulicaria* de Norte América (Mergey et al., 2008).

Daphnia peruviana, fue reportada en lagunas de Cochabamba y de Potosí, fue descrita por primera vez en el Perú (Harding, 1955), muestra una alta melanización y se confirmó que su linaje diverge de un conjunto de *Daphnia* estudiadas en Argentina, donde no presentó especies hermanas de norte o sudamérica, por lo que es considerada una especie endémica del continente Sudamericano (Adamowicz, Hebert, & Marinone, 2004); *D. peruviana* es una especie restringida a Perú, Bolivia, Chile y Argentina (Coronel et al., 2007). En Bolivia ha sido registrada en lagos y bofedales de los altos Andes tropicales (Coronel et al., 2007) y en el presente estudio).

Los cladóceros en Bolivia necesitan mayor atención, ya que aún existen zonas poco exploradas donde

podrían existir micro-endemismos muy localizados; pero más importante es que aún se tienen vacíos en la identificación específica, debido muchas veces a la confusa taxonomía, pobre descripción y a que las claves taxonómicas en su mayoría son realizadas en base a especies de zonas templadas y no así de ecosistemas tropicales como los de Bolivia.

En la actualidad los análisis genéticos apoyan la existencia de endemismo continental y provincial en algunos grupos del zooplancton, y se sabe que pocas especies son realmente cosmopolitas. Esto refuerza la necesidad de estudios regionales detallados, así como revisiones de algunos grupos de especies descritas por anteriores autores (Adamowicz et al., 2004; Kotov et al., 2010). Por ejemplo, las evidencias aportadas por Adamowicz et al. (2004), sugieren que 14 de las 19 especies de *Daphnia*, conocidas actualmente para Sudamérica, son endémicas para este continente, es más, se espera que el endemismo a nivel de los cladóceros en el Neotrópico puede ser incrementado con el estudio de los cuerpos de agua de alta montaña de los Andes (Kotov et al., 2010), y que éste no se limitaría únicamente al hallazgo de endemismos sino al hallazgo de nuevas especies y probablemente nuevos géneros para la ciencia.

Agradecimientos

Especiales agradecimientos a Jorge Coronel como parte del equipo de muestreo y a Neshmi Salaués por el apoyo en el trabajo de laboratorio. Esta investigación fue financiada por la International Foundation for Science, Suecia (IFS).

5. Referencias bibliográficas

- Acosta, F., Cadima, M., & Maldonado, M. (2003). Patrones espaciales de la comunidad planctónica lacustre en un gradiente geofísico y bioclimático en Bolivia. Spatial patterns of the planktonic community in lakes on a geophysical and bioclimatological gradient in Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, (13), 31–53.
- Adamowicz, S. J., Hebert, P. D. N., & Marinone, M. C. (2004). Species diversity and endemism in the *Daphnia* of Argentina: a genetic investigation. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 140(2), 171–205.

- Aguilera, X., Crespo, G., Declerck, S., & de Meester, L. (2006). Diel vertical migration of zooplankton in tropical high mountain lakes (Andes, Bolivia). *Polish Journal of Ecology*, 54, 453–464.
- Aguilera, X., Declerck, S., de Meester, L., Maldonado, M., & Ollevier, F. (2006). Tropical high Andes lakes: A limnological survey and an assessment of exotic rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 36(4), 258–268.
- Aguilera, X., Mergeay, J., Wollebrants, A., Declerck, S., & Meester, L. de. (2007). Asexuality and polyploidy in *Daphnia* from the tropical Andes. *Limnology and Oceanography*, 52(5), 2079–2088.
- Bayly, I. A. E. (1992). Fusion of the genera *Boeckella* and *Pseudoboeckella* (Copepoda) and revision of their species from South America and sub-Antarctic islands. *Revista Chilena de Historia Natural*, 65(1), 17–63.
- Cabrol, N. A., Feister, U., Häder, D.-P., Piazena, H., Grin, E. A., & Klein, A. (2014). Record solar UV irradiance in the tropical Andes. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 1–6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00019>
- Coronel, J. S., Declerck, S., & Brendonck, L. (2007). High-altitude peatland temporary pools in Bolivia house a high cladoceran diversity. *Wetlands*, 27(4), 1166–1174. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2007\)27\[1166:hptpib\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2007)27[1166:hptpib]2.0.co;2)
- de los Ríos, P., & Soto, D. (2009). Estudios limnológicos en lagos y lagunas del Parque Nacional Torres del Paine (51 S, Chile). *Anales Del Instituto de La Patagonia*, 37(1), 63–71. SciELO Chile.
- Green, J. (1995). Altitudinal distribution of tropical planktonic Cladocera. In *Cladocera as Model Organisms in Biology* (pp. 75–84). Springer.
- Harding, J. P. (1955). The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. XV. Crustacea: Copepoda. *Transactions of the Linnean Society of London*, 1(3), 219–247.
- Jacobsen, D., & Dangles, O. (2017). *Ecology of high altitude waters*. Oxford University Press.
- Kotov, A. A., Sinev, A. Y., & Berrios, V. L. (2010). The Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) of six high altitude water bodies in the North Chilean Andes, with discussion of Andean endemism. *Zootaxa*, 2430(1), 1–66.
- Madsen, P. B., Morabowen, A., Andino, P., Espinosa, R., CAUVY-FRAUNIÉ, S., Dangles, O., & Jacobsen, D. (2015). Altitudinal distribution limits of aquatic macroinvertebrates: an experimental test in a tropical alpine stream. *Ecological Entomology*, 40(5), 629–638.
- Maldonado, M., Maldonado-Ocampo, J. A., Ortega, H., Encalada, A. C., Carvajal-Vallejos, F. M., Rivadeneira, J. F., ... Rivera-Rondón, C. A. (2011). Biodiversity in aquatic systems of the tropical Andes. *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*, 276–294.
- Menu-Marque, S., & Locascio de Mitrovich, C. (1998). Distribución geográfica de las especies del género *Boeckella* (Copepoda, Calanoida, Centropagidae) en la República Argentina. *Physis B*, 56, 1–10.
- Menu-Marque, Silvina, Morrone, J. J., & Locascio de Mitrovich, C. (2000). Distributional patterns of the South American species of *Boeckella* (Copepoda: Centropagidae): a track analysis. *Journal of Crustacean Biology*, 20(2), 262–272.
- Mergeay, J., Aguilera, X., Declerck, S., Petrussek, A., Huyse, T., & de Meester, L. (2008). The genetic legacy of polyploid Bolivian *Daphnia*: the tropical Andes as a source for the North and South American *D. pulicaria* complex. *Molecular Ecology*, 17(7), 1789–1800. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03679.x>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858.
- Navarro, G., & Maldonado, M. (2004). *Geografía ecológica de Bolivia, vegetación y ambientes acuáticos* (2da ed.). Cochabamba, Bolivia.: Centro de Ecología Simón I. Patiño.

- Pinto, J. (1991). Distribución del zooplancton en la parte boliviana del lago. *El Lago Titicaca: Síntesis Del Conocimiento Limnológico Actual. Hisbol-ORSTOM, La Paz*, 277–283.
- Quenta, E., Molina-Rodriguez, J., Gonzales, K., Rebaudo, F., Casas, J., Jacobsen, D., & Dangles, O. (2016). Direct and indirect effects of glaciers on aquatic biodiversity in high Andean peatlands. *Global Change Biology*, 22(9), 3196–3205.
- Román, Y., & del Castillo, M. (1999). Estructura Vertical de la Taxocenosis de microcrustáceos planktónicos en la Laguna Mynas Kkota, La Paz-Bolivia (Vertical structure of the plankton microcrustacean taxocoenocis in the Mynas Kkota Lake, La Paz-Bolivia)—*Rev. Bol. de Ecol*, 6, 145–153.
- Scheihing, R., Cardenas, L., Nespolo, R. F., Krall, P., Walz, K., Kohshima, S., & Labarca, P. (2010). Morphological and molecular analysis of centropagids from the high Andean plateau (Copepoda: Calanoidea). *Hydrobiologia*, 637(1), 45–52.
- Segers, H., Meneses, L., & del Castillo, M. (1994). Rotifera (Monogononta) from Lake Kothia, a high-altitude lake in the Bolivian Andes. *Archiv Für Hydrobiologie*, 227–236.
- Suárez-Morales, E., & Gasca, R. (1996). Planktonic copepods of Bahía de la Ascensión, Caribbean coast of Mexico: a seasonal survey. *Crustaceana*, 69(2), 162–174.
- Thomasson, K. (1959). *Nahuel Huapi: Plankton of some lakes in an Argentine national park, with notes on terrestrial vegetation*. Sv. växtgeografiska sällsk.
- Torres, L. E., & Rylander, K. (2006). Diversity and abundance of littoral cladocerans and copepods in nine Ecuadorian highland lakes. *Revista de Biología Tropical*, 54(1), 131–137.

Evaluación de la estabilidad de los productos usados para la cloración del agua como método de desinfección en la EPSA AUAP de la población de El Paso, Cochabamba

Rodrigo Mejía^{1*}, Alvaro R. Mercado¹

¹Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*rodri_9417_@hotmail.es

Resumen

Se evaluó la estabilidad de soluciones de cloro, en recipientes opacos y translucidos exponiéndolas a la luz solar durante 7 días, las soluciones de cloro fueron obtenidas a partir de marcas comerciales de: hipoclorito de calcio (marca HTH y QP Chlor), dicloroisocianurato de sodio (marca Tonga) y ácido tricloroisocianúrico (marca Nove Quim).

Los resultados mostraron que cuando se exponen a la luz solar en frascos translucidos: el hipoclorito de calcio (cualquier marca) tiene pérdidas de hasta el 40,56% de su concentración en 1 hora de exposición; el dicloroisocianurato de sodio tiene buena estabilidad manteniendo hasta el 36,89% de su concentración a los 7 días de exposición; el ácido tricloroisocianúrico tiene una baja estabilidad conservando el 25,49% después de 3 días de exposición y sólo el 0,78% a los 7 días. Mientras, cuando se exponen a la luz solar, en frascos opacos (no translucidos), la estabilidad del cloro cualquiera sea su composición es muy buena, logrando conservar hasta el 97% de su concentración después de 7 días de ser expuestas a la radiación solar.

Palabras clave: *Ácido tricloroisocianúrico, Cloración, Dicloroisocianurato de sodio, Hipoclorito de calcio, Pureza del cloro.*

Abstract

Stability of chlorine solutions was evaluated, in opaque and translucent containers exposing them to sunlight for 7 days, chlorine solutions obtained from calcium hypochlorite (brand HTH and QP Chlor), sodium dichloroisocyanurate (Brand Tonga) and trichloroisocyanuric acid (Brand Nove Quim) were tested.

Results showed that when exposed to sunlight in translucent vials: calcium hypochlorite (any brand) has losses of up to 40.56% of its concentration in 1 hour of exposure; sodium dichloroisocyanurate has good stability maintaining up to 36.89% of its concentration at 7 days of exposure; trichloroisocyanuric acid has a low stability preserving 25.49% after 3 days of exposure and only 0.78% at 7 days. Meanwhile, when exposed to sunlight, in opaque (non-translucent) jars, the stability of chlorine whatever its composition is very good, managing to preserve up to 97% of its concentration after 7 days of being exposed to solar radiation.

Key words: *Trichloroisocyanuric acid, Chlorination, Sodium dichloroisocyanurate, Calcium hypochlorite, chlorine purity.*

1. Introducción

El limitado acceso al agua de buena calidad o la inadecuada calidad de la prestación del servicio de las EPSA's (Entidades Prestadoras de Servicios de Agua), representan un grave riesgo para la salud, en especial de los niños, ancianos y personas con bajas defensas o salud disminuida.

El funcionamiento inadecuado de los sistemas de abastecimiento de agua y de las estructuras sanitarias,

exigen una acción urgente y cuidadosa. Estas deficiencias son responsables de que alrededor de 80.000 niños mueran cada año en América Latina (OPS, 1999). Esto se puede verificar con el reporte de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020), respecto a las 10 principales causas de defunción, en las cuales se aprecia que las enfermedades diarreicas (infecciones intestinales) son la novena principal causa de muerte en el año 2019 con 1.5 millones de muertes, esto a nivel global. Viendo desde los países con ingresos bajos, las enfermedades diarreicas son

la segunda principal causa de muerte, en países de ingreso mediano bajo son la sexta principal causa y, en los países de ingreso mediano alto y alto las enfermedades diarreicas no se encuentran dentro de las 10 principales causas de defunción. Se calcula que solo la contaminación del agua potable provoca más de 485.000 muertes por diarrea al año (OMS, 2022).

El reporte de la OMS de las principales causas de defunción pone en evidencia dos factores: el primero, es que, en los países desarrollados es evidente que la desinfección está incorporada como un proceso ineludible, fijo y establecido, así como el cuidado y mantenimiento de sus sistemas de abastecimiento de agua; el segundo, es que, en los países en desarrollo ocurre lo contrario, los tratamientos de potabilización, sobre todo en áreas rurales, son imprecisos y tienen una mala operación y escaso mantenimiento. Es así que, los procesos de desinfección y cuidado del agua son pobres y no se respeta el papel que cumplen como protección de la salud pública (OMS, 2020).

La mejora de las fuentes de abastecimiento de agua también conlleva la reducción del gasto en salud, ya que las personas tienen menos probabilidades de enfermar y de incurrir en gastos médicos y están en mejores condiciones de permanecer económicamente productivas (OMS, 2019).

La gran mayoría de los problemas de salud relacionados de forma evidente con el agua, se deben a la contaminación por microorganismos (OMS, 2006). Se estima que, en todo el mundo, al menos 2000 millones de personas se abastecen de una fuente de agua potable que está contaminada por heces (OMS, 2022).

El riesgo que representa a la salud la presencia de sustancias químicas en el agua, es distinto al que suponen los contaminantes microbiológicos que tienen efectos más agudos. De otra parte, son pocas las sustancias químicas que, en las concentraciones que normalmente pueden detectarse en el agua contaminada, causan problemas a la salud con efectos inmediatos, ya que normalmente éstos se manifiestan tras largos períodos de exposición. Por eso se afirma que la vigilancia y el control de los contaminantes químicos tienen importancia secundaria cuando el agua está contaminada por microorganismos (Rojas, 2002).

Por otra parte, la inspección sanitaria hace posible la detección de condiciones o situaciones que aumentan el riesgo de contaminación del agua y que no siempre pueden ser determinados por los análisis rutinarios,

a menos que, la contaminación esté ocurriendo en el momento del muestreo. La inspección sanitaria se realiza a través de la apreciación sensorial de las condiciones físicas de las instalaciones de los sistemas de producción (fuentes de agua), almacenamiento y distribución del agua, principalmente de las partes más vulnerables y vinculadas a la conservación de la calidad del agua, lo que permite la identificación de las deficiencias estructurales u operativas en el sistema de abastecimiento (Rojas, 2002).

Si bien existen varios métodos de desinfección del agua, el uso del cloro tiene ventajas reconocidas a nivel global como ser: tiene una acción germicida de espectro amplio, persistencia en los sistemas de distribución de agua, facilidad de instalación, los compuestos de cloro son disponibles globalmente y son relativamente económicos (Solsona & Méndez, 2002).

Considerando los párrafos anteriores, se optó por realizar la evaluación de los productos usados para la cloración del agua (desinfección del agua) en la EPSA de la población de “El Paso” del municipio de Quillacollo, Cochabamba (Mejía, 2020).

2. Métodos

Evaluación de los productos usados para la cloración del agua

Uno de los mayores problemas de los sistemas de desinfección del agua a base de cloro, es que los operadores de sistemas de agua comunitarios en Bolivia, desconocen el comportamiento y las características de los productos de cloro usados para la desinfección. Dado que el cloro es volátil, hace que pierda su concentración de cloro activo (concentración de cloro disponible para la desinfección), en especial cuando este entra en contacto directo con la luz solar. Esto conlleva a una desinfección deficiente del agua, debido a la pérdida de concentración del desinfectante cloro (Coronado & Ledezma, 2005).

Si no se garantiza la desinfección del agua, la comunidad queda expuesta al riesgo de brotes de enfermedades intestinales y otras enfermedades infecciosas. Es particularmente importante evitar los brotes de enfermedades transmitidas por el agua de consumo, dada su capacidad de infectar simultáneamente a un gran número de personas y, potencialmente, a una gran proporción de la comunidad antes de ser detectada (OMS, 2006).

Es por ello, que se realizaron distintos ensayos a los productos usados para la cloración del agua en la EPSA de la población de El Paso, en Cochabamba, Bolivia, como ser: evaluación de la pureza y la estabilidad del

cloro de los productos usados para la cloración del agua más comunes en Cochabamba.

Se seleccionaron 4 productos comerciales para la cloración, los cuales se muestran en la Tabla 1

Tabla 1

Productos comerciales seleccionados para la evaluación

Productos de evaluación			
Composición	Formula química	Marca comercial	Estado
Hipoclorito de calcio	Ca(ClO) ₂	HTH	Granulado
Hipoclorito de calcio	Ca(ClO) ₂	QP Chlor	Granulado
Dicloroisocianurato de sodio	C ₃ Cl ₂ N ₃ NaO ₃	Tonga	Granulado
Ácido tricloroisocianúrico	C ₃ Cl ₃ N ₃ O ₃	Nove Quim	Granulado

Se optó por dos productos con el mismo compuesto activo (hipoclorito de calcio) pero de distintas marcas comerciales, debido a que el hipoclorito de calcio es el más comercial y usado para el tratamiento del agua por las EPSA's.

Pureza de los productos usados para la cloración del agua

La pureza de un producto para la desinfección del agua, hace referencia a la cantidad de cloro disponible para la desinfección del agua, el cual se conoce como cloro activo.

Para la determinación de la pureza o cloro activo de los productos utilizados, se siguió el método yodométrico (Greenberg & Eaton, 1999), también reconocido por la norma boliviana NB649.

Para evaluar la estabilidad de los productos se prepararon soluciones de cloro de aproximadamente 1000 ppm con agua destilada para cada producto seleccionado, se midió la concentración del cloro activo a distintos tiempos de exposición, a la sombra y a la luz solar. Los productos para los ensayos se encontraban en forma granular.

Estabilidad de las soluciones de cloro

Se realizaron ensayos de estabilidad de la solución de cloro donde, soluciones de cloro en recipientes de polietileno translucidos y opacos (recipiente forrado con papel negro) se expusieron a la luz solar, y se determinó la pureza de las soluciones antes y después de la exposición.

3. Resultados

Los cuatro productos de cloración utilizados, sus purezas teóricas y las reales o medidas se encuentran en la Tabla 2

Tabla 2

Pureza o cloro activo de los productos utilizados para la cloración del agua

% PUREZA o CLORO ACTIVO		
Nombre del producto comercial	% Real	% Teórica
QP-CHLOR	63,56	70
NOVE QUIM 1	48,67	90
HTH	50,18	65
TONGA	55,37	60

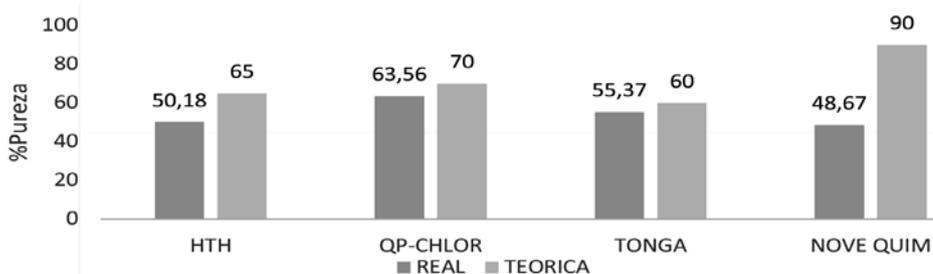


Figura 1. Comparación entre la pureza teórica y medida de los productos evaluados.

Se observó que el cloro activo medido era menor que el teórico mencionado en el recipiente en el que se comercializa (Figura 1). Por lo cual, se efectuó una comparación del cloro activo inicial de los productos y a los 40 días después de ser almacenados en la oscuridad, en lugar seco y sellados en lo posible, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3

Variación del cloro activo o pureza después de abierta la envoltura, a los 40 días

Variación del cloro activo o pureza después de abierta la envoltura a los 40 días					
Composición	Fórmula química	Marca comercial	% Cloro activo		% Pérdida
			Inicial	Final	
Hipoclorito de calcio	Ca(ClO) ₂	HTH	50,18	38,87	22,54
Hipoclorito de calcio	Ca(ClO) ₂	QP-Chlor	63,56	62,23	2,09
Dicloroisocianurato de sodio	C ₃ Cl ₂ N ₃ NaO ₃	Tonga	55,37	54,78	1,05
Ácido tricloroisocianurico	C ₃ Cl ₃ N ₃ O ₃	Nove Quim	48,67	35,11	27,86

En la tabla 3 se puede notar que uno de los productos de hipoclorito de marca HTH y el ácido tricloroisocianúrico perdieron más del 20% cloro activo, frente al otro producto de hipoclorito de calcio y al dicloroisocianurato de sodio que luego de 40 días de la apertura del recipiente perdieron menos del 2.1%.

Esto puede tener repercusiones a la hora de adquirir los productos a ser usados por el comité de agua, considerando el tiempo y tipo de almacenamiento que se realicen.

Estabilidad de los productos usados para la cloración

Las soluciones de cloro son inestables y su estabilidad depende de su composición química, como ser: hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, dicloroisocianurato de sodio, ácido tricloroisocianúrico u otros. Existen distintos factores que lo vuelven muy inestable como ser (Cáceres, 1971):

- Temperatura
- pH
- Iluminación (luz artificial o luz solar)
- Tipo de frasco o almacenamiento
- Concentración
- Impurezas
- Tipo de composición

Los ensayos de estabilidad de cloro mostraron los siguientes resultados:



Figura 2. Recipientes de politeileno utilizados en prueba de estabilidad. a) Cubiertos con material opaco, b) Translucidos.

Tabla 4

Variación de la concentración de los productos para la cloración en frasco translúcido y expuestos al sol

1 g de producto en 500ml de agua destilada, en frasco translúcido y expuestas al sol								
Día	QP-CHLOR		NOVE QUIM 1		HTH		TONGA	
	Concentración [ppm]	pH	Concentración [ppm]	pH	Concentración [ppm]	pH	Concentración [ppm]	pH
0	1.271,241	10,95	973,38	2,70	1.003,52	10,73	1.095,71	5,76
3	7,09	10,75	248,15	2,59	0,36	10,07	856,12	4,45
7	1,36	8,41	7,60	2,31	0,20	8,03	404,24	2,87

El dicloroisocianurato de sodio y el ácido tricloroisocianúrico, llevan estabilizadores como el ácido cianúrico el cual tiene la finalidad de reducir la descomposición fotoquímica a causa de la radiación solar. Sin embargo, solo se observa una mejor estabilidad del cloro en el dicloroisocianurato de sodio, marca TONGA, y una muy baja estabilidad y/o resistencia por parte del ácido tricloroisocianúrico. Ambos tienen pH ácido debido a su composición, en especial el tricloro (marca NOVE QUIM) que mantiene un pH por debajo de 2,70, lo que causa desprendimiento de gases irritantes. En cambio, el dicloro presenta un descenso del pH alcanzando pH 4,45, causando un incremento en la liberación de gases irritantes para los tractos respiratorios.

El pH de la solución de hipoclorito para concentraciones mayores a 1.000 ppm de cloro es mayor a 10, evitando un desprendimiento brusco de gases; no se aprecia gases notablemente irritantes para los ductos respiratorios por parte de la solución de hipoclorito.

Se observó un brusco descenso del cloro activo en el hipoclorito de calcio $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ (en los dos productos comerciales evaluados) al ser expuestas al sol, por lo que, se procedió a realizar una evaluación del descenso de cloro activo de hipoclorito de calcio por hora, en el producto marca HTH debido a que es el más comercial, obteniendo los resultados mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 5

Solución de hipoclorito de calcio (marca HTH), en frasco translúcido y expuesta al sol

Solución de hipoclorito de calcio (marca HTH), en frasco translúcido y expuesta al sol			
Hora	Tiempo de exposición [h]	Concentración [ppm]	% Pérdida
14:30	0	684,24	0,00
15:30	1	406,23	40,63
16:30	2	308,64	54,89
17:30	3	189,64	72,28

Se aprecia un descenso notable del cloro activo en el hipoclorito de calcio, con un aproximado de 25% de pérdida por cada hora de exposición. Esto evidencia la pérdida casi total del cloro activo en el primer día de exposición a la luz solar. Ensayos realizados por

Nicoletty y Magalhaés (1996) con hipoclorito de sodio bajo condiciones de recipientes transparentes expuestos al sol presentan reducciones de cloro activo similares, pero en un tiempo de hasta 8 meses.

Tabla 6

Variación de la concentración de los productos para la cloración frasco opaco (no translúcido) y expuestas al sol

6 g de producto en 3000 ml de agua destilada, en frasco opaco y expuestas al sol								
Día	QP-CHLOR		NOVE QUIM 1		HTH		TONGA	
	Concentración [ppm]	pH	Concentración [ppm]	pH	Concentración [ppm]	pH	Concentración [ppm]	pH
0	1.244,65	10,74	702,11	3,28	777,47	10,60	1.107,42	5,45
3	1.261,01	10,76	683,48	3,10	773,67	10,59	1.073,28	6,12
7	1.257,06	10,73	863,46	2,58	772,29	10,51	1.015,88	5,50

Cuando la solución se expone a la radiación solar en un recipiente opaco no translucido, se observa (Tabla N° 6) una muy buena estabilidad en todos los productos, a excepción del ácido tricloroisocianúrico, el cual presenta un ascenso en la concentración del cloro activo, esto posiblemente debido a que la dilución del producto es lenta, dando por entendido que la dilución del ácido tricloroisocianúrico se completó durante el ensayo. El pH en todos los productos se mantiene prácticamente constante.

4. Conclusiones

Existen diversos productos para la cloración de sistemas de agua con diferentes composiciones.

El ácido tricloroisocianúrico (marca Nove Quim), mostró una baja estabilidad ante la exposición directa a la luz solar teniendo una pérdida de hasta el 75% a los 3 días y 100% a los 7 días, una alta volatilidad ante la manipulación del mismo, alto desprendimiento de gases irritantes para los ojos y tractos respiratorios, pH muy ácido de hasta 2,4 para concentraciones mayores a 700 ppm y una muy baja solubilidad, lo cual dificulta su preparación para su respectivo uso o análisis.

El dicloroisocianurato de sodio (marca Tonga), mostró una buena estabilidad ante su exposición a la luz solar, teniendo una pérdida de hasta 22% a los 3 días y 63% a los 7 días, un desprendimiento medio de gases irritantes para los tractos respiratorios, una solubilidad completa, una pureza de 55.37% y un pH ácido de 5,6 para concentraciones superiores a 1000 ppm.

El hipoclorito de calcio (marca HTH o QP-Chlor), mostró una muy baja estabilidad ante su exposición a la luz solar, teniendo pérdidas de hasta 25% por

hora de exposición, bajo desprendimiento de gases irritantes, pH alcalino mayor a 10 para concentraciones superiores a 800 ppm, una solubilidad casi completa (contiene impurezas insolubles), un cloro activo variable dependiendo su marca comercial entre el 50 a 65 %.

La estabilidad del cloro (cual sea su marca, procedencia o tipo de producto utilizado) se ve muy afectada ante su exposición a la luz solar en recipientes translucidos, sin embargo, esta se evita con recipientes no translucidos opacos.

La temperatura tiene baja influencia en su estabilidad. Durante los ensayos, las muestras alcanzaron los 35°C, pero a pesar de ello, se mantuvo una muy buena estabilidad en recipientes no translucidos en todos los productos.

Los productos con composición ácido tricloroisocianúrico y dicloroisocianurato de sodio presentan una mejor estabilidad ante su exposición a la luz solar debido a que estos llevan estabilizantes como el ácido cianúrico, lo cual disminuye drásticamente su pH.

5. Recomendaciones

Se debe evitar cualquier contacto directo de la luz solar con la solución de cloro que se usa para la cloración del agua, en especial del hipoclorito de calcio (cualquier marca), en todo el sistema de desinfección.

Se debe tener especial cuidado en la selección de los productos a utilizar para la desinfección del agua tomando en cuenta su accesibilidad, estabilidad, toxicidad, pureza y costo.

Agradecimientos

El trabajo fue posible gracias al convenio suscrito entre la Universidad Mayor de San Simón y la Asociación de Usuarios de Agua Potable de El Paso (AUAP). Se reconoce de gran manera el apoyo del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental por el apoyo de sus investigadores, auxiliares y el uso de su infraestructura y equipamiento.

6. Referencias bibliográficas

- Caceres, O. (1971). *Manual para la desinfección de aguas mediante la cloración* (1st ed.; M. de Salud, ed.). Lima.
- Coronado, O., & Ledezma, M. (2005). *Manual teorico-practico desinfección de aguas con soluciones de cloro* (p. 9). p. 9. Cochabamba: Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental.
- Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (eds). (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20th ed.; L. Clesceri, A. Greenberg, & A. Eaton, Eds.). APHA, AWWA, WEF.
- Mejia, R. (2020). *Evaluación y diagnostico de riesgos de contaminación del agua del sistema de abastecimiento de agua potable de “El paso”, del municipio de Quillacollo y estudio de la estabilidad de los productos usados para la cloración*. Universidad Mayor de San Simón.
- Nicoletti, M. A., & Magalhães, J. (1996). Influencia del envase y de factores ambientales en la estabilidad de la solución de hipoclorito sódico. *Boletín Oficina Sanitaria Panamericana*, 121(4), 301–309.
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable: Recomendaciones. In *OMS*.
- OMS. (2020). Las 10 principales causas de defunción. Retrieved July 14, 2022, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- OMS. (2022). Agua para consumo humano. Retrieved July 14, 2022, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-WATER>
- OPS. (1999). *La desinfección del agua*.
- Rojas, R. (2002). *GUÍA PARA LA VIGILANCIA Y CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO* (OPS, Ed.). Retrieved from <http://www.cepis.ops-oms.org>
- Solsona, F., & Méndez, J. (2002). Desinfección de agua. In CEPIS (Ed.), *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*. Lima.

Evaluación reológica del asfalto modificado con grano de caucho reciclado por vía húmeda respecto a su desempeño a temperaturas altas

Jahel S. Ledezma

Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

sarvialedezma@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

Desde el año 2019, a través del proyecto “Mercados para el reciclaje” se trabaja de forma conjunta con la fundación SWISSCONTACT para investigar las opciones de incorporación de grano de caucho reciclado en pavimentos flexibles, buscando la reducción de este tipo de residuos a través de la aplicación de un modelo de economía circular en el mercado Cochabambino. De esta forma, la primera fase atendió la adición grano de caucho por vía seca en la elaboración de mezclas asfálticas y la segunda fase, busca la modificación del cemento asfáltico con grano de caucho por vía húmeda. Para esto, la presente investigación evaluó la incorporación de seis diferentes contenidos de grano de caucho reciclado 9, 12, 15, 18 y 21% en un asfalto convencional 60/70. El proceso fue realizado en un mezclador de alto cizallamiento a una temperatura de 180°C, velocidad de 700 rpm y tiempo de mezclado de 90 minutos. Posteriormente, se evaluó las propiedades reológicas de los asfaltos modificados en seis rangos de temperatura y se comparó con la respuesta del asfalto base y un asfalto SBS de modificación industrial. Los resultados muestran que la adición de caucho en el asfalto base, mejora la respuesta de los parámetros de viscosidad, $G^*/\sin\delta$, módulo complejo G^* y ángulo de fase δ , mejorando el desempeño a altas temperaturas del cemento asfáltico base. Comparando con el asfalto industrial SBS, se observa que el porcentaje de adición de 9% de GCR presenta características similares en su estado original, pero en estado envejecido a corto plazo aumenta su rigidez.

Palabras clave: *Grano de caucho reciclado, Asfalto modificado, Reología de ligantes.*

Abstract

Since 2019, through the “Markets for recycling” project, we have been working together with the SWISSCONTACT foundation to investigate the options for incorporating recycled rubber grain into flexible pavements, seeking to reduce this type of waste through the application of a circular economy model in the Cochabamba market. In this way, the first phase attended the improvement of rubber grain by dry way in the preparation of asphalt mixtures and the second phase, seeks the modification of asphalt cement with rubber grain by wet way. For this, the present investigation evaluated the incorporation of six different recycled rubber grain contents 9, 12, 15, 18 and 21% in a conventional 60/70 asphalt. The process was carried out in a high shear mixer at a temperature of 180°C, speed of 700 rpm and mixing time of 90 minutes. Subsequently, the rheological properties of the modified asphalts were evaluated in six temperature ranges and compared with the response of the base asphalt and an industrial modified SBS asphalt. The results show that the addition of rubber in the base asphalt improves the response of the parameters of viscosity, $G^*/\sin\delta$, complex modulus G^* and phase angle δ , improving the performance at high temperatures of the base asphalt cement. Comparing with the SBS industrial asphalt, it is observed that the percentage of increase of 9% of GCR presents similar characteristics in its original state, but in the short-term aged state its stiffness increases.

Key words: *Recycled rubber grain, Modified asphalt, Binder rheology.*

1. Introducción

Según los datos de Smithers (2022), se estima que para finales del año 2022 el mercado mundial de llantas alcanzará más de los 2700 millones de unidades. Considerando que estas cifras continuarán en aumento debido a la evolución inherente del

transporte terrestre, es necesario indagar en métodos que reutilicen los futuros residuos de este mercado. En este sentido, en el área de ingeniería civil, es posible emplear este residuo en forma de grano de caucho reciclado (GCR) como modificador en cementos asfálticos (Daryoush, 2015). Diversas investigaciones

demonstraron los beneficios de la incorporación de caucho en el desempeño del cemento asfáltico, tal como el aumento del módulo del ligante, lo que otorga mayor rigidez a la mezcla asfáltica y se traduce en el aumento de la resistencia de este material a la formación de roderas, disminuyendo los costos de mantenimiento futuro (NDOT, 2016).

El asfalto modificado con caucho presenta mejoras en el grado de desempeño del cemento asfáltico convencional, especialmente en el rango superior de temperaturas (Rodezno y Kaloush, 2011), ya que el caucho aumenta la elasticidad, flexibilidad y durabilidad del asfalto frente a procesos de envejecimiento. Respecto a los parámetros reológicos (Cong *et al*, 2012), menciona que el asfalto modificado con caucho incrementa los parámetros de viscosidad y módulo complejo (G^*), del mismo modo que disminuye el ángulo de fase (δ) asociado con la respuesta elástica del material.

Respecto al contenido óptimo de caucho a incrementar en el asfalto virgen Mehdi *et al* (2019), menciona que muestras que presentan un contenido de caucho

entre 5 a 12% modifican el grado de desempeño del cemento asfáltico virgen en al menos un intervalo de temperatura, dependiendo del grado de desempeño inicial que este presente.

2. Materiales y métodos

A continuación, se describe los materiales usados en el estudio, así como las pruebas realizadas en laboratorio.

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento asfáltico

Considerando la aplicación local de los resultados de la presente investigación y dado que el cemento asfáltico es un material importado, se optó por emplear el asfalto de mayor preferencia de las plantas municipales en Cochabamba, de esta forma, se trabajó con un cemento asfáltico convencional de procedencia peruana con clasificación por penetración 60/70 o mediante la evaluación de su grado de desempeño PG 64-28. Los resultados obtenidos en la caracterización del cemento asfáltico base se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Resultados de la caracterización del cemento asfáltico 60/70

Ensayo	Unidad	Norma	Requerimiento	Resultado
Penetración (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	ASTM D5	Min. 60	60.67
Peso específico (25°C)	-	ASTM D70	-	1.052
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	cm	ASTM D113	Min. 100	107
Recuperación elástica (20cm, 25°C)	%	ASTM D6084	-	5.9
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	-	45.8
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Min. 232	312.6

Fuente: Rios, 2022

2.1.2 Grano de caucho reciclado

El grano de caucho reciclado utilizado proviene de una empresa de triturado de caucho ubicado en la ciudad de Cochabamba, donde emplean un proceso de trituración por corte mecánico para la obtención del GCR. En consecuencia, este tipo de proceso

otorga al grano de caucho una superficie más rugosa (NDOT, 2016). Las propiedades del grano de caucho reciclado se presentan en la Tabla 2, conforme la norma ASTM D5603 (ASTM, 2019) y la composición granulométrica se detalla en la Tabla 3, de acuerdo a la ASTM C136 (ASTM, 2015).

Tabla 2

Resultados de los ensayos de caracterización del GCR

Ensayo	Unidades	Norma	Requerimiento	Resultado
Contenido de humedad	%	UNE103-300	0.75	0.73
Densidad aparente	g/cm ³	-	-	0.418
Contenido de acero	%	UNE 14243	0.01	0.26

Fuente: Rios, 2022

Tabla 3

Granulometría del GCR

Tamiz N°	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
Diámetro (mm)	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
Granulometría del GCR	100.00	89.54	29.76	5.48	0.45

Fuente: Rios, 2022

2.2 Metodología

Para la obtención del asfalto modificado con caucho se procedió a incorporar diferentes porcentajes de GCR al asfalto convencional 60/70, empleando una temperatura, velocidad y tiempo de mezclado recomendados en la revisión literaria. Basado en la evaluación del grado de desempeño de ligantes, descrito en la norma ASTM D6373 (ASTM, 2021), se procedió a evaluar las características reológicas del asfalto resultante en el reómetro de corte dinámico y el viscosímetro rotacional. Dado que se busca evaluar el desempeño del cemento asfáltico modificado con caucho a altas temperaturas, la evaluación reológica se realizó en los estados original y envejecido a corto plazo, aplicándose para este último, el envejecimiento del ligante en el horno de película delgada rotacional (RTFO).

Tómese en cuenta que, para evaluar las características del proceso de modificación del asfalto con el caucho, los resultados obtenidos fueron comparados con el asfalto convencional original 60/70 y con otro asfalto modificado industrialmente con SBS (*Styrene Butadiene Styrene*) de origen ruso y clasificación por grado de desempeño PG 76-28.

2.2.1 Preparación del asfalto modificado con caucho por vía húmeda

Para la modificación del cemento asfáltico 60/70 con caucho, se emplearon los porcentajes de 9, 12, 15, 18 y 21% de GCR en relación al peso del ligante (Peiliang C, 2013; Daryoush Y, 2015; Xiaorui Z, 2021). El procedimiento de modificación fue realizado en un mezclador de laboratorio de alto cizallamiento construido por el Programa de Investigación en Tecnología Aplicada (PITA) perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica de la UMSS. El mezclador cuenta con una cuba térmica para el control de temperatura y un sistema de velocidad controlada para el ajuste de revoluciones, en el cual es posible modificar aproximadamente 2500 gramos de cemento asfáltico. Con el fin de conseguir una integración homogénea del GCR dentro la matriz asfáltica, se adoptaron los siguientes parámetros: temperatura de modificación de 180°C, velocidad de cizallamiento

de 700 rpm y un período de compatibilización de 90 minutos después del mezclado visual del GCR y el ligante asfáltico (Cong, 2013).

Cabe señalar que, inmediatamente finalizado el proceso de mezclado, se procedió con los ensayos en el reómetro de corte dinámico y viscosímetro rotacional. En caso de que el ligante fuera almacenado para ser ensayado en una fecha posterior, este se calentaba y se se agitaba vigorosamente antes de iniciar las pruebas.

2.3 Ensayos de desempeño del cemento modificado con caucho

2.3.1 Viscosímetro rotacional

El ensayo de viscosidad rotacional fue llevado a cabo en el viscosímetro Brookfield, a una temperatura de 135°C de acuerdo a la normativa ASTM D6373 (ASTM, 2021). La viscosidad está relacionada con los procesos de mezclado y compactado, en este sentido, se limita el valor máximo de viscosidad a 3(Pa*s). para obtener un adecuado recubrimiento del agregado, así como para fines de bombeo del ligante en planta.

2.3.2 Reómetro de corte dinámico

Las propiedades reológicas del cemento asfáltico modificado con caucho, en su estado original y envejecido a corto plazo, se midieron empleando el reómetro de corte dinámico (DSR) en condiciones de esfuerzo controlado. Para esto, se ensayaron pequeñas muestras de cemento asfáltico modificado con caucho, en sus diferentes porcentajes de adición, entre placas paralelas de 25mm de diámetro separadas a 1mm de distancia, frecuencia fija de 10rad/s, y barridos de temperatura en intervalos de 6°C, conforme la norma ASTM D6373 (ASTM, 2021). Como resultado del proceso descrito, se determinaron las siguientes propiedades viscoelásticas del asfalto: módulo complejo (G^*), ángulo de fase (δ) y la relación $G^*/\text{sen}\delta$, siendo este último la relación entre el esfuerzo cortante máximo y la deformación máxima que proporciona la medida de resistencia total a la deformación permanente del cemento asfáltico ensayado. Para cada muestra evaluada, tres especímenes fueron ensayados

y el promedio de los resultados fueron usados en el análisis de los resultados.

2.3.3 Ensayos de desempeño a altas temperaturas del cemento asfáltico

La evaluación de desempeño a altas temperaturas se realizó de acuerdo al método Superpave mediante la clasificación por grado de desempeño (PG) de ligantes, el mismo que considera el rango de temperaturas altas de diseño en el cual el cemento asfáltico presentará un adecuado comportamiento en campo. Para esto, se realizó la evaluación de las propiedades reológicas medidas en el ensayo DSR, para los seis rangos de temperatura definidos (64, 70, 76, 85, 88 y 94°C) en el estado original y envejecido a corto plazo de las muestras evaluadas.

3. Resultados

3.1 Viscosidad rotacional

Los resultados de viscosidad rotacional del cemento asfáltico convencional 60/70, asfalto modificado con diferentes porcentajes de caucho y el asfalto modificado con polímero SBS se presentan en la Figura 1. En el mismo se advierte que la viscosidad aumenta con el incremento de caucho incorporado en el cemento asfáltico base. El mayor incremento de viscosidad se observa para porcentajes de 15, 18 y 21% que presentan un incremento de 1.21 a 2.27 veces la viscosidad del cemento modificado con 12% de GCR.

Considerando que la norma ASTM D6373 recomienda un valor máximo de viscosidad de 3(Pa*s), sólo el porcentaje de adición de 9% de GCR cumpliría con este requerimiento. Por otro lado, comparando el valor de viscosidad del asfalto modificado SBS, se observa que este es muy similar al valor de viscosidad del cemento asfáltico con 9% de GCR.

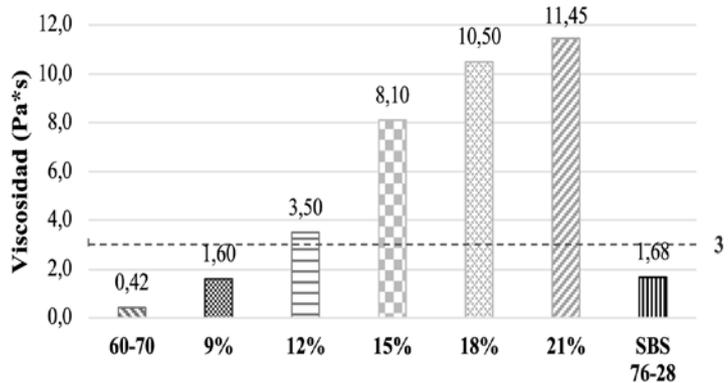


Figura 1. Valor de viscosidad en diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

3.2 Evaluación del comportamiento reológico y desempeño a altas temperaturas del cemento asfáltico

La relación entre el valor de $G^*/\sin\delta$ respecto a los diferentes porcentajes de GCR añadidos al cemento asfáltico base 60/70 en sus estados original y envejecido, se presentan en la Figura 2 y 3.

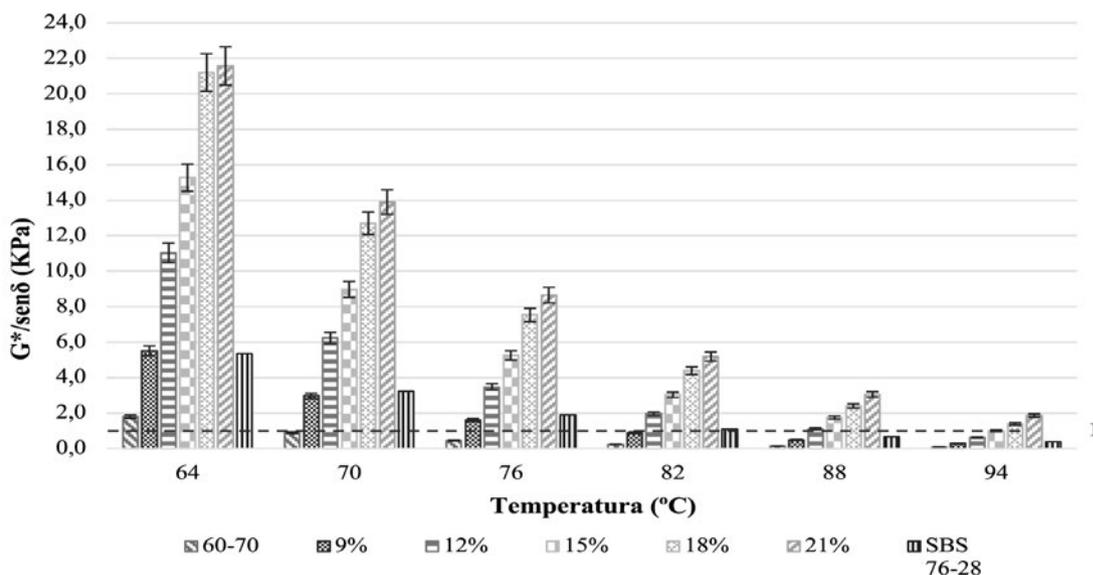


Figura 2. Valor de $G^*/\sin\delta$ en estado original de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

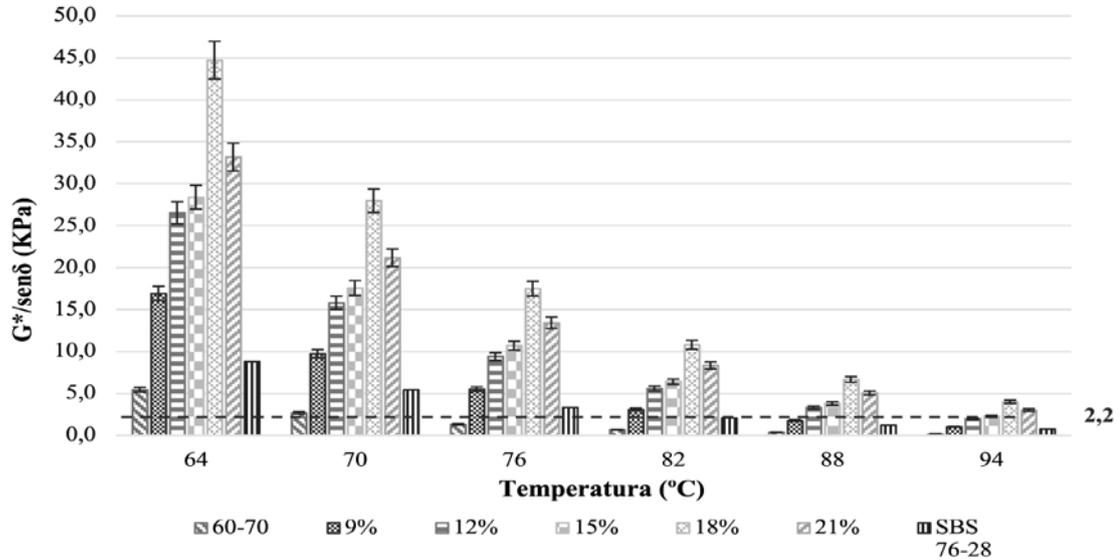


Figura 3. Valor de $G^*/sen\delta$ en estado envejecido a corto plazo de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

El parámetro $G^*/sen\delta$ indica la resistencia a la deformación permanente del cemento asfáltico a altas temperaturas, de esta forma, para reducir la formación de roderas en el pavimento es que el sistema de clasificación por grado de desempeño (PG) limita el valor de $G^*/sen\delta$ a valores menores a 1.0 (KPa) para asfaltos en estado original y para estado envejecido a corto plazo a valores menores a 2.2 (KPa).

Observando la Figura 2 y 3, se evidencia que el valor de $G^*/sen\delta$ aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de GCR en el asfalto base, tanto para el estado original como envejecido a corto plazo. Nótese, por ejemplo, que la adición de 9% de GCR incrementa la clasificación a alta temperatura en dos intervalos superiores (76°C) respecto al asfalto base 60/70 que presenta una clasificación de 64°C. En este sentido, adiciones de 18 y 21% de GCR pueden incrementar hasta en cinco intervalos la resistencia del asfalto base, llegando a la clasificación de 94°C.

Por otro lado, analizando el comportamiento del asfalto modificado SBS en relación al cemento modificado con 9% de GCR, se observa ambos muestran un

comportamiento similar en estado original, pero en estado envejecido a corto plazo, el cemento asfáltico con 9% de GCR presenta un mejor comportamiento que el SBS.

Debido a las características viscoelásticas del cemento asfáltico, es que el módulo complejo de este material es altamente dependiente de los cambios de temperatura. Tal como se observa en la Figura 4, en el estado original, de forma general el módulo complejo del material disminuye a medida que aumenta la temperatura. Analizando el comportamiento del ligante que presenta incorporación de caucho, es posible observar la mejora en el módulo complejo del asfalto base 60/70, el mismo que presentaba módulos menores a 2 KPa a 64°C, reduciéndose a la mitad por cada aumento de intervalo de temperatura hasta un valor próximo a cero a los 94°C. Los aumentos más significativos en el módulo complejo se dan para incorporaciones superiores a 12% de GCR, presentando los porcentajes de 18 y 21% un comportamiento similar, de la misma forma que sucede con el valor de 9% de GCR y el asfalto modificado SBS.

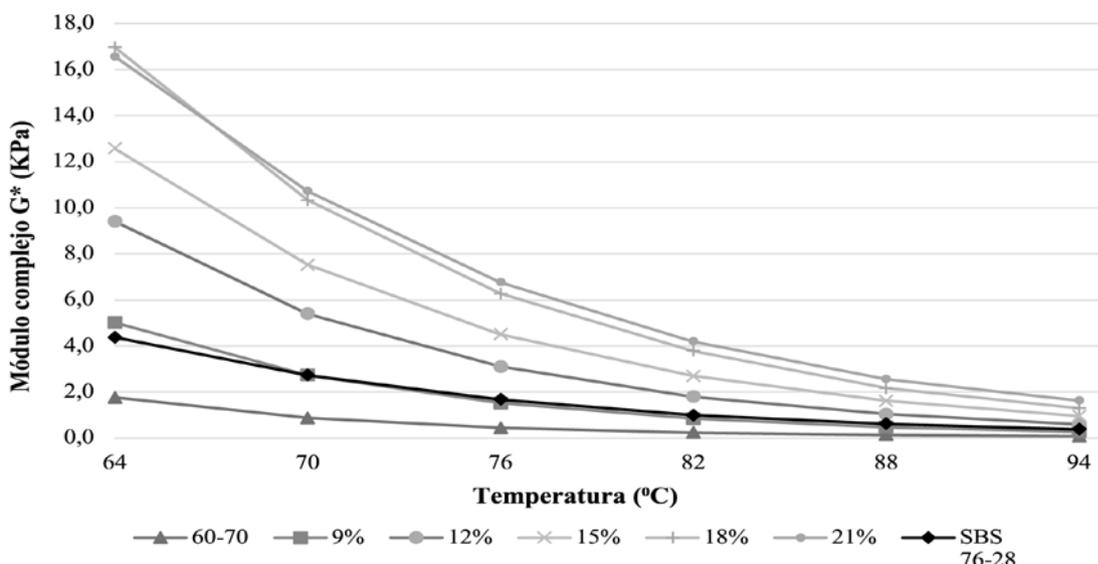


Figura 4. Valor de G^* en estado original de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

En relación al comportamiento en el estado envejecido a corto plazo, presentado en la Figura 5, se observa que, a diferencia del estado original, el asfalto modificado con 18% de GCR presenta un módulo superior al de 21%, situación similar al asfalto de 9% de GCR y SBS. Esto indica que tanto el asfalto con 18% y 9% de GCR alcanzarán estados de rigidez superiores que los

asfaltos de 21% y SBS, respectivamente, en un tiempo de 5 años de vida útil (tiempo representado por el envejecimiento a corto plazo) lo cual es desfavorable para el cemento asfáltico, ya que tenderá a rigidizarse y en consecuencia presentar fisuraciones en la mezcla asfáltica, sin embargo, este aspecto debe evaluarse con el comportamiento a bajas temperaturas.

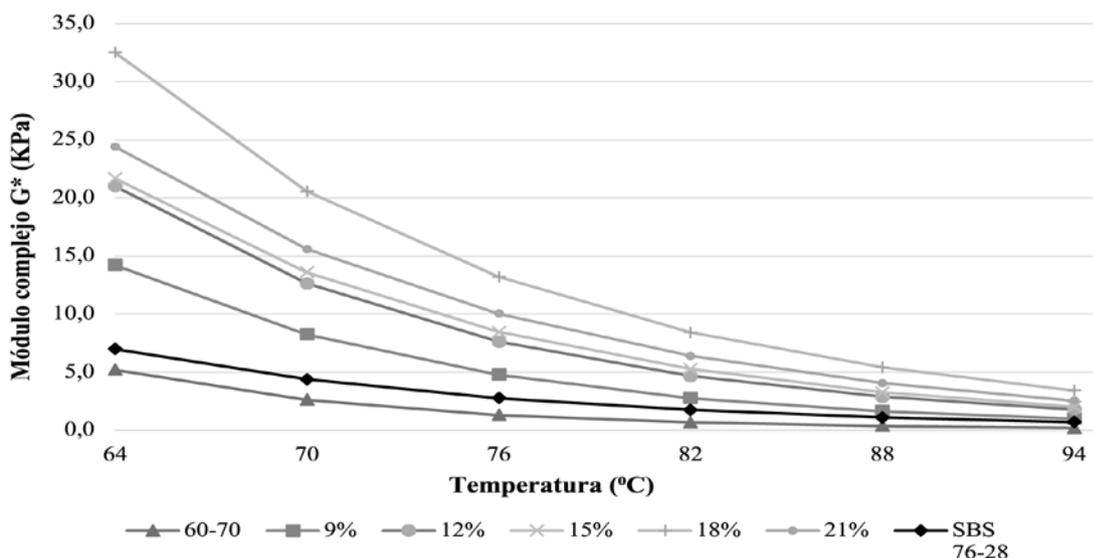


Figura 5. Valor de G^* en estado envejecido a corto plazo de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

Respecto al parámetro del ángulo de fase δ , este parámetro también se asocia con el comportamiento viscoelástico del cemento asfáltico, cuanto mayor sea el valor de δ (próximo a 90°) mayor será su componente viscoso y cuanto menor sea su valor

(próximo a 0°) mayor será su respuesta elástica. Es así que, las Figuras 6 y 7, presentan la tendencia de este parámetro en estado original y envejecido a corto plazo de los ligantes en estudio, respectivamente.

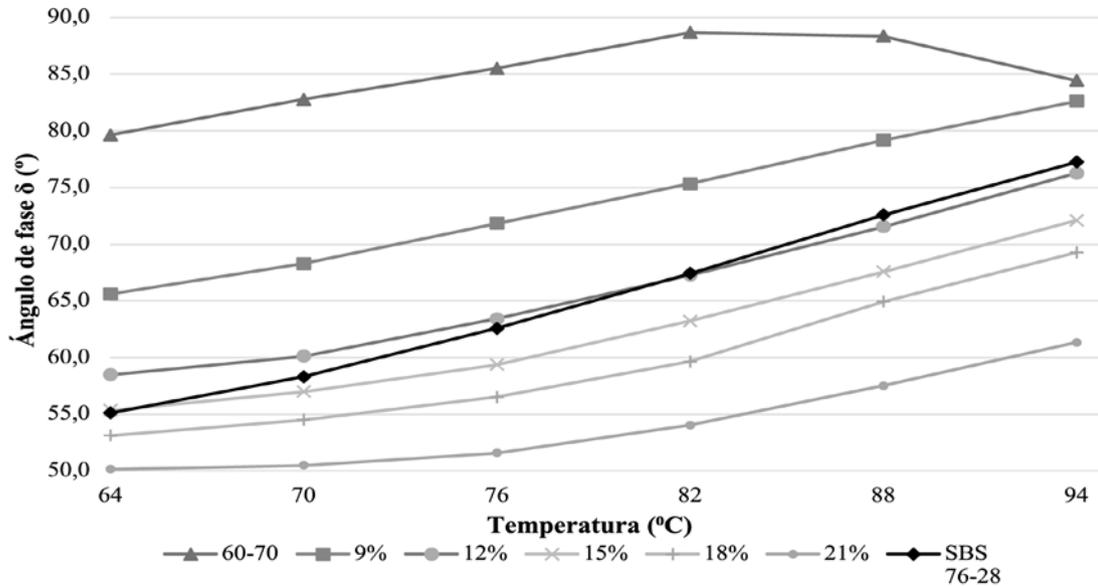


Figura 6. Valor de δ en estado original de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

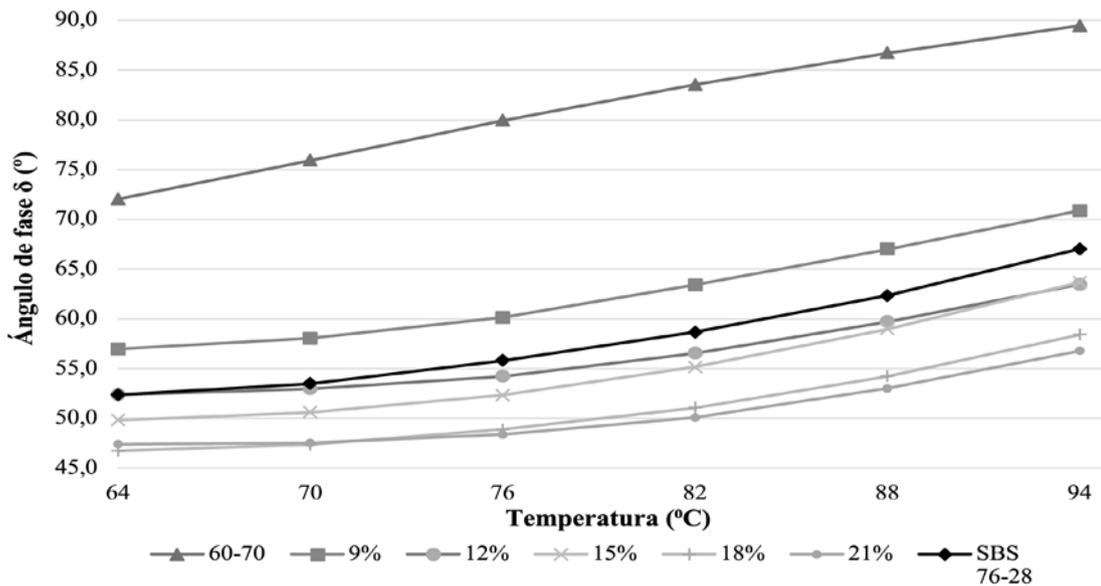


Figura 7. Valor de δ en estado envejecido a corto plazo de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

Analizando ambas figuras, es posible evidenciar las mejoras en la respuesta elástica del asfalto base 60/70 a medida que se incrementa el porcentaje de GCR. Respecto a este parámetro, se observa que el ligante con 12% de GCR presenta una respuesta elástica similar al ligante SBS y que el ligante con 9% de GCR tiene una tendencia más viscosa que este último al presentar un mayor ángulo de fase. De forma general, para todos los porcentajes de adición de GCR, se observa que, en estado envejecido a corto plazo, todos presentan un ángulo de fase menor a 70° , contrario al comportamiento del cemento asfáltico original

60/70, el mismo que reporta ángulos superiores a este, evidenciando el potencial del GCR en el aumento de la respuesta elástica y por consiguiente en la reducción de la deformación del material a altas temperaturas.

4. Conclusiones

La modificación de cemento asfáltico con GCR por vía húmeda mejora la respuesta reológica del material, dado que, a mayor incorporación de caucho mayor es la respuesta del parámetro $G^*/\text{sen}\delta$ asociado con la reducción de ahuellamiento en el pavimento.

Sin embargo, se sugiere que, para efectos de manejo en planta no se supere con adiciones mayores a 12% debido al incremento en la viscosidad del material.

Realizando la comparación con un cemento asfáltico modificado SBS, comercializado industrialmente por las ventajas de este polímero en el comportamiento reológico a altas temperaturas, el asfalto modificado con 9% de GCR presenta un comportamiento similar en los parámetros de viscosidad, $G^*/\sin\delta$ y módulo complejo (G^*) en su estado original. No obstante, respecto a la respuesta en estado envejecido a corto plazo, se observa que el asfalto con 9% de GCR presenta mayor rigidez, lo que indica que este material podría presentar una tendencia a la formación de grietas, aspecto debe cotejarse con la respuesta a bajas temperaturas.

De forma general, para todas las adiciones de GCR, se observa un aumento en el parámetro de la respuesta elástica del ángulo de fase δ , para las condición en estado original como envejecido a corto plazo. Esto muestra el potencial del GCR para mejorar las propiedades elásticas del cemento asfáltico a alta temperatura.

5. Recomendaciones

Se recomienda continuar con ensayos reológicos a bajas temperaturas respecto a la modificación de asfaltos con GCR por vía húmeda para realizar la categorización completa por grado de desempeño del ligante.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos y a la fundación SWISSCONTACT por brindar los medios necesarios por los cuales fue posible ejecutar este proyecto.

6. Referencias bibliográficas

- Abdelrahman, M. (2006). Controlling Performance of Crumb Rubber-Modified Binders Through Addition of Polymer Modifiers. *Transportation Research Board of the National Academies*, 7.
- ASTM. (2006). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. EEUU: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2015). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. EEUU: American Society for Testing and Materials.

- ASTM. (2019). *Classification for Rubber Compounding Materials-Recycled Vulcanizate Rubber*. EEUU: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2019). *Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*. EEUU: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2021). *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. EEUU: American Society for Testing and Materials.
- Daryoush Yousefi Kebriaa, S. R. (2015). Laboratory investigation of the effect of crumb rubber on the characteristics and rheological behaviour of asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 14.
- Mehdi Khalilia, Kazem Jadidia, Moses Karakouziana, Serji Amirkhanian. (2019). Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method. *Case Studies in Construction Materials*, 20.
- NDOT, N. D. (2016). *Evaluation of new innovations in rubber-modified asphalt binders and rubberized asphalt mixes for nevada DOT*. Carson City, EEUU: NDOT Research Report.
- P. Cong, P. Xun, M. Xing, S. Chen. (2012). *Investigation of asphalt binder containing various crumb rubber and asphalt*. Construction building materials.
- Peiliang Cong, P. X. (2013). Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts. *Construction and Building Materials*, 10.
- Rios Urquidi, B. (2022). *Estudio de la influencia del tiempo y temperatura de digestión en mezclas asfálticas mejoradas con grano de caucho reciclado por vía seca*. Cochabamba: Proyecto de Pregrado, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón (UMSS).
- Rodezno, M. C., & Kaloush, K. E. (2011). *Implementation of asphalt-rubber mixes into the mechanistic empirical pavement design guide*. EEUU: oad Materials and Pavement Design.
- Smithers. (2022). *The Future of Global Tires to 2022*. EEUU: Smithers.
- Xiaorui Zhang, C. H. (2021). Evaluating the Rheological Properties of High-Modulus Asphalt Binders Modified with Rubber Polymer Composite Modifier. *Materials*, 16.

Fitorremediación de suelos contaminados por cadmio y plomo mediante plantas florales plantadas en terreno agrícola en ensayos con medios salinos

Erick Ferrufino-Guardia^{1,*}, Christian Estívariz¹, M. Micaela Guamán¹

¹Centro de Biotecnología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*nanferru@hotmail.com

Resumen

Las especies florales *Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium* fueron estudiadas por su potencial aplicación en la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo. El estudio fue llevado a cabo *in situ* durante 12 semanas y se dividió en 2 etapas de muestreo, añadiendo en la segunda etapa soluciones salinas a las plantas. Los resultados obtenidos demostraron que estas especies florales son hiperacumuladoras de cadmio y plomo, y poseen la capacidad de extraer y tolerar en sus tejidos elevadas concentraciones de estos metales sin sufrir alteraciones en su desarrollo. Además, en el caso de las especies *Calendula officinalis* y *Plumbago auriculata* el medio salino y el tiempo de crecimiento fueron factores favorables para el incremento en la acumulación de dichos metales pesados. La investigación también reveló de qué forma se distribuyen estos metales pesados en las distintas partes de las plantas, permitiendo analizar la capacidad de translocación que poseen.

Palabras clave: *Especies florales, Factor de bioconcentración, Fitorremediación, Metales pesados, In situ.*

Abstract

The floral species *Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* and *Chrysanthemum morifolium* were studied for their potential application in the phytoremediation of soils contaminated with cadmium and lead. The study was carried out *in situ* for 12 weeks and it was divided into 2 sampling stages, adding saline solutions to the plants in the second stage. The results obtained showed that these floral species are hyperaccumulators of cadmium and lead, and have the ability to extract and tolerate high concentrations of these metals in their tissues without suffering alterations in their development. Further, in the case of the species *Calendula officinalis* and *Plumbago auriculata*, the saline medium and the growth time were favorable factors for the increase in the accumulation of the mentioned heavy metals. The research also revealed how these heavy metals are distributed in the different parts of the plants, making it possible to analyze their translocation capacity.

Key words: *Floral species, Bioconcentration factor, Phytoremediation, Heavy metals.*

1. Introducción

En las décadas recientes la contaminación del suelo con distintos metales pesados provenientes de las actividades minera, petrolera, metalurgia, industrias de fertilizantes o la incineración de residuos se ha ido incrementando enormemente a nivel mundial. En el caso de Bolivia, una de las principales causas de contaminación con metales pesados es la minería artesanal (Chamba-Eras *et al.*, 2022). Esto representa una grave amenaza a la seguridad de los alimentos y a los ecosistemas ambientales en todo el mundo,

además de provocar la alteración de la diversidad de poblaciones biológicas en los suelos, lo que resulta en problemas con el crecimiento de las plantas y su supervivencia (Mani *et al.*, 2020). Asimismo, los cultivos que se desarrollen en estos suelos pueden contener niveles altamente alarmantes de metales pesados que pueden ser transferidos a la cadena trófica animal y humana, llegando a causar diversas y graves enfermedades en las personas (Aransiola *et al.*, 2019).

Debido a este problema nacieron técnicas mecánicas y químicas para enmendar los suelos. Sin embargo,

estas técnicas son demasiado costosas y en ocasiones generan impactos adicionales sobre los ecosistemas. Por ello surge la fitorremediación como una alternativa más verde y sustentable. La fitorremediación es el proceso de utilizar plantas que tengan la capacidad de extraer, acumular y/o degradar los contaminantes en sus tejidos, sin sufrir alteraciones en su desarrollo. Esta tecnología posee los beneficios de ser menos costosa, aplicarse *in situ*, no requiere remoción de tierra con maquinaria, se aplica en grandes superficies de suelo y tiene una buena aceptación pública debido a la atractiva percepción de las plantas o flores (Aransiola *et al.*, 2019).

Existen muchas especies que han tenido éxito en la absorción de metales pesados como arsénico, cadmio, cromo y plomo, desde plantas herbáceas hasta plantas florales, incrementando el interés sobre estas especies en las últimas décadas. Tal es el caso de las especies *Aster novibelgii*, *Dahlia sambucifolia*, *Calendula officinalis* y *Chrysanthemum indicum*, las cuales fueron estudiadas para determinar su capacidad de fitorremediación frente a suelos contaminados con cromo (Ramana *et al.*, 2013). Así también, las especies florales *Althaea rosea* e *Impatiens Balsamina* fueron estudiadas, demostrado una gran capacidad de acumulación de metales pesados como cadmio y plomo (Liu *et al.*, 2008). Las plantas florales hiperacumuladoras tienen un beneficio adicional al ser utilizadas en la absorción de metales pesados, y es que una vez que hayan extraído los metales pesados en sus tejidos, pueden ser cosechadas y comercializadas, y de esta forma establecerse como una actividad más sustentable financieramente.

Esta investigación, tuvo como principal objetivo la evaluación del desempeño de tres especies florales nativas hiperacumuladoras de metales pesados (*Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium*) en la absorción y descontaminación *in situ* de suelos con cadmio y plomo. Considerando un estudio *in situ* se puede examinar mejor la eficacia de la fitorremediación, ya que se simulan las condiciones reales y los resultados de los ensayos realizados a esta escala son más ventajosos en aplicaciones prácticas de métodos de fitorremediación (Aransiola *et al.*, 2019).

2. Métodos y Materiales

Preparación del suelo

Se prepararon 9 parcelas en el terreno agrícola proporcionado por la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales de la UMSS. Cada parcela tenía una superficie de 3 metros en cada lado. En cada una se realizaron 3 surcos con una separación de 50 cm entre surcos y parcelas.

En cada surco de cada parcela se plantaron 3 plantas de la misma especie, para tener 9 plantas en cada parcela, haciendo un total de 27 plantas por especie. Se definió una separación de 20 cm entre plantas de cada surco.

Contaminación del suelo

El suelo fue contaminado con sales de cadmio y plomo del agua proveniente principalmente de la refinería de YPFB “Gualberto Villarroel” y en menor medida de la represa de La Angostura, esta agua tenía una concentración promedio 9,47 ppm de cadmio y 585,69 ppm de plomo. Todas las parcelas eran regadas con grandes cantidades de estas aguas, debido principalmente a que el suelo era muy seco.

Preparación de soluciones salinas

Se prepararon dos soluciones de cloruro de sodio (NaCl) de concentraciones diferentes, una solución de 100 ppm y otra de 300 ppm. Asumiendo que cada planta abarcaba 4 kg de tierra se determinó que para la solución de 100 ppm se requería 8 g de NaCl por litro y para la solución de 300 ppm se requería 24 g de NaCl por litro.

Tratamiento de las plantas

Durante 12 semanas las 9 parcelas fueron regadas con agua contaminada con cadmio y plomo. Posteriormente, a partir de la séptima semana se agregó también soluciones salinas de cloruro de sodio a dos de las parcelas de cada especie. El tratamiento con agua contaminada con cadmio y plomo se realizó dos veces por semana a todas las parcelas, mientras que el tratamiento con soluciones salinas se realizó una sola vez por semana. Una de las parcelas de cada especie fue regada con solución salina de 100 ppm, y la otra fue regada con solución salina de 300 ppm. El tratamiento con soluciones salinas consistía en inyectar 50 mL de la solución de cloruro de sodio

directamente hacia la raíz a una distancia de 5 a 10 cm del tallo.

Toma de muestras de tierra, plantas y agua de riego

Durante la etapa experimental se realizaron 2 muestreos. El primer muestreo se llevó a cabo 6 semanas después de haber realizado la plantación, donde se extrajeron 2 plantas de cada especie por parcela con un aproximado de 1 kg de su tierra, haciéndose un total de 18 plantas. El segundo muestreo se llevó a cabo 12 semanas después de haber realizado la plantación, se extrajeron 3 plantas de cada especie por parcela, con aproximadamente 0,5 kg de su respectiva tierra para las dos primeras plantas y 1 kg correspondiente a la tercera planta.

Al extraer la tierra de cada planta, se consideró un perímetro de 10 cm alrededor de la planta, esta cantidad de tierra fue homogeneizada y se retiró alrededor de 1 kg por cada planta. Además, cada planta fue cortada y dividida en raíz, tallo, hojas y flor, este procedimiento se realizó con todas las plantas del primer muestreo, y con la tercera muestra de cada parcela del segundo muestreo.

Determinación de la concentración de metales pesados y el factor de bioconcentración (BC)

Todas estas muestras se expusieron al sol durante 3 a 4 días para su secado para luego obtener su peso en seco. Tras el secado, se procedió a moler todas las muestras de las plantas con un molador manual y luego se realizó la digestión abierta con soluciones de ácido nítrico para las plantas y una mezcla digestora de ácido nítrico con ácido perclórico para las muestras de tierra, esta etapa se llevó a temperaturas entre 200°C y 300°C.

Las muestras digeridas fueron filtradas y diluidas para finalmente determinar la concentración de plomo y cadmio mediante el uso del espectrofotómetro de absorción atómica (PerkinElmer. AAnalyst 200).

Las muestras del agua de riego fueron tomadas en 4 ocasiones: al inicio de la plantación, 2 semanas después, en la fase de primer muestreo y al haber transcurrido 3 meses desde la plantación inicial. En la determinación de los metales pesados de este tipo de muestras se utilizó la misma técnica de la digestión ácida seguida de la toma de lectura con el espectrofotómetro.

Con los datos de las lecturas obtenidas para cada especie se determinó el factor de bioconcentración (BC), que es la relación de la concentración del metal en la raíz ($C_{\text{metal en raíz}}$) respecto de la concentración del metal en la tierra después de que las plantas absorbieron los metales ($C_{\text{metal en tierra}}$):

$$BC = \frac{C_{\text{metal en raíz}}}{C_{\text{metal en tierra}}}$$

Este factor es un importante indicador que nos permite identificar si una especie vegetal es o no hiperacumuladora de un determinado metal pesado y es uno de los indicadores más utilizados para la determinación de especies vegetales que son hiperacumuladoras de metales pesados (Mani *et al.*, 2020). Una especie vegetal es hiperacumuladora si su BC es mayor a 1. Los resultados de este factor son explicados en el siguiente subtítulo y pueden ser apreciados en la Figura 1 y Figura 2.

3. Resultados y Discusión

Es importante mencionar que las 3 especies florales lograron extraer el cadmio y plomo que se encontraban presentes en la tierra de las parcelas donde se plantaron y en el agua con la que se regó. En la Figura 1 y Figura 2 podemos evidenciar que, en el caso del cadmio, los factores de bioconcentración de las 3 especies se sitúan entre 1,6 y 1,9, y para el primer muestreo el factor de bioconcentración del plomo es aún mayor, estando entre 3 y 4, lo cual nos indica que las plantas llegaron a acumular mayores concentraciones de plomo que de cadmio, esto podría deberse a que la concentración de plomo en el agua de riego era superior que la del cadmio. Estos resultados demuestran que estas especies florales efectivamente son hiperacumuladoras de cadmio y plomo en condiciones *in situ*.

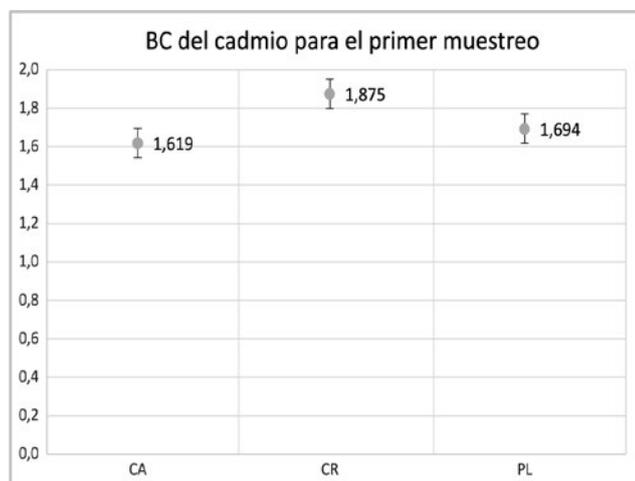


Figura 1. Factor de bioconcentración (BC) del cadmio para las especies florales *Calendula officinalis* (CA), *Chrysanthemum morifolium* (CR) y *Plumbago auriculata* (PL), pertenecientes al primer muestreo.

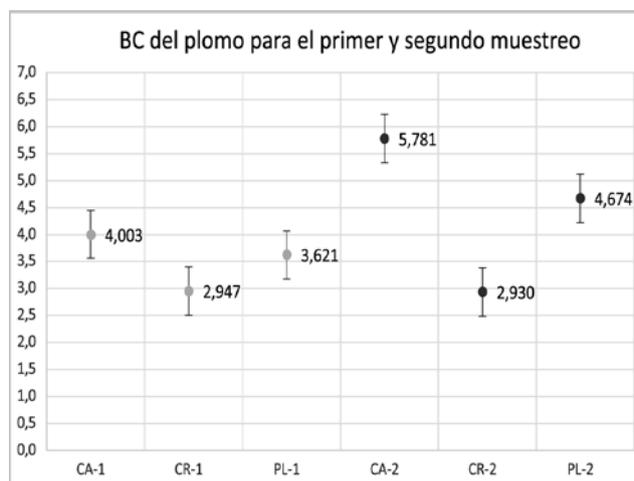


Figura 2. Factor de bioconcentración (BC) del plomo para las especies florales *Calendula officinalis* (CA), *Chrysanthemum morifolium* (CR) y *Plumbago auriculata* (PL), perteneciente al primer muestreo (puntos azules) y al segundo muestreo (puntos rojos).

También podemos observar que el *Chrysanthemum morifolium* es el mejor absorbedor de cadmio, seguido por el *Plumbago auriculata*, y para el plomo, la especie con mejor desempeño de absorción es la *Calendula officinalis* seguido por el *Plumbago auriculata*. Realizando una comparación entre los factores de bioconcentración de las especies de este estudio y los de especies florales hiperacumuladoras de otras investigaciones se encuentra lo siguiente:

En un estudio reciente de las especies *Erato polymnioides* y *Miconia sp.* los investigadores obtuvieron niveles superiores de absorción de cadmio (Chamba-Eras *et al.*, 2022), aproximadamente 4 veces más que las especies *Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium*. Sin embargo, las especies del presente estudio alcanzaron factores de bioconcentración de plomo mucho más elevados que de las especies *Erato polymnioides* y *Miconia sp.*, entre a 4 a 6 veces superior. Vale la pena mencionar que las concentraciones de cadmio y plomo de los suelos contaminados del estudio de Chamba-Eras *et al.* (2022) eran muy parecidas a las del suelo de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales de la UMSS.

En otra investigación realizada con las especies *Impatiens Balsamina* y *Althaea rosea* se encontró que estas especies logran hiperacumular mayores cantidades de cadmio en sus brotes en tratamientos con niveles de cadmio similares a los del presente trabajo (Liu *et al.*, 2008). De la misma manera, analizando los

niveles de acumulación de la especie floral *Melastoma malabathricum L.* obtenidos en una investigación realizada en Malasia (Norleela Selamat *et al.*, 2014), se encontró que esta especie logró alcanzar factores de bioconcentración muy elevados a comparación de los obtenidos para las especies *Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium* en tratamientos con concentraciones menores de plomo a las del presente trabajo, por lo que esta especie es claramente superior en cuanto a la extracción de plomo.

En la Figura 2 podemos apreciar que, con el paso del tiempo y el efecto de las soluciones salinas aplicadas, los factores de bioconcentración del plomo de la *Calendula officinalis* y del *Plumbago auriculata* se incrementaron desde 4 hasta 5,78 y desde 3,62 hasta 4,67 respectivamente, en el caso del *Chrysanthemum morifolium* el factor de bioconcentración se mantuvo. Por lo cual, es probable que la aplicación del cloruro de sodio y a mayor tiempo de desarrollo de las plantas, se logre una mayor extracción de plomo encontrado en el suelo contaminado, especialmente con las especies *Calendula officinalis* y *Plumbago auriculata*. A continuación, se presentan las gráficas donde se puede observar la distribución del cadmio y plomo en las distintas partes de cada planta.

En la Figura 3 y Figura 4 se puede observar que no existe una clara tendencia de la forma en la que las especies florales distribuyen al cadmio y plomo en sus distintas partes, por lo cual se requerirían futuros

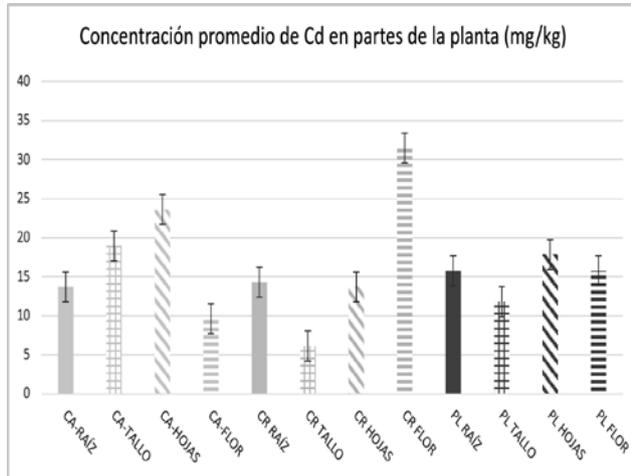


Figura 3. Concentración promedio de cadmio (mg/kg) en distintas partes de las especies florales *Calendula officinalis* (CA), *Chrysanthemum morifolium* (CR) y *Plumbago auriculata* (PL).

estudios con mayor tiempo de desarrollo para las plantas con el objetivo de encontrar una tendencia y evaluar la capacidad de translocación de cada especie, es decir, qué tan bien trasladan al metal pesado desde sus raíces hacia sus demás partes como los tallos u hojas. Sin embargo, comparando la distribución del cadmio y plomo en la especie *Calendula officinalis* con la distribución hallada por Liu *et al.*, (2008), se encuentra que de igual forma el plomo tiende a concentrarse más en las raíces, mientras que existe una diferencia en la distribución del cadmio, ya que, en esta investigación, el cadmio se acumula sobre todo en las raíces y no así en los tallos como se muestra en la Figura 3.

Los resultados obtenidos de los factores de bioconcentración de plomo para la *Calendula officinalis* fueron superiores a los obtenidos en el estudio realizado por Mani *et al.* (2020), una causa probable podría ser que en dicho estudio la concentración inicial en el suelo contaminado era 20 veces menor que la concentración de plomo en los suelos donde se plantaron las plantas de *Calendula officinalis* de nuestra investigación.

Realizando el mismo análisis para el *Chrysanthemum morifolium*, utilizando como referencia una investigación realizada en conjunto por investigadores de China e Irlanda (Zhang *et al.*, 2020) sobre esta especie, el factor de bioconcentración del cadmio encontrado en dicho estudio es algo superior al encontrado en el presente trabajo, por lo cual los resultados que se obtuvieron serían bastante parecidos

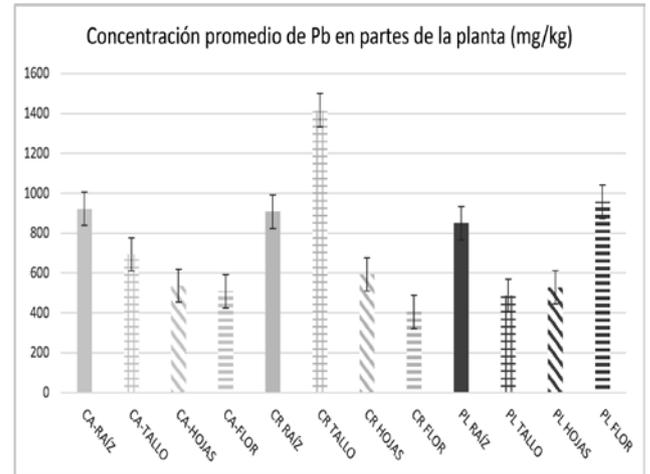


Figura 4. Concentración promedio de plomo (mg/kg) en distintas partes de las especies florales *Calendula officinalis* (CA), *Chrysanthemum morifolium* (CR) y *Plumbago auriculata* (PL).

entre ambos estudios. Comparando el factor de bioconcentración del plomo, se encuentra que el factor de bioconcentración obtenido en la presente investigación es el triple del encontrado en el estudio realizado por Zhang *et al.* (2020).

Para la comparación de los resultados obtenidos del *Plumbago auriculata* se revisó un estudio realizado en Polonia (Tokarz *et al.*, 2020), en dicho estudio se presentan las concentraciones de plomo en las raíces y tallos, donde se observa que el plomo se deposita más que todo en las raíces, hecho que coincide con los resultados que se obtuvieron, lo que indicaría que el *Plumbago auriculata* no tiene mucha capacidad de transferir el plomo de sus raíces hacia sus tallos.

4. Conclusiones

Se documentó el desempeño de estas plantas en el medio contaminado durante 12 semanas, donde la mayoría de las plantas se desarrollaron de forma normal, incluso en muchos casos, las plantas de las especies *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium* lograron obtener buenas cantidades de biomasa.

El factor de bioconcentración fue de bastante utilidad para determinar si las especies vegetales estudiadas son hiperacumuladoras o no de cadmio y plomo en condiciones *in situ*, ya que solamente se requirió encontrar la concentración de los metales pesados en las raíces o tallos de cada planta y en el suelo donde se realizó el estudio de campo. Asimismo, otro indicador

sugerido para ampliar el estudio de estas especies hiperacumuladoras es el factor de translocación, el cual relaciona la concentración del metal pesado en el tallo de la planta respecto a su raíz.

El cloruro de sodio es beneficioso para la extracción de plomo en las especies de *Chrysanthemum morifolium* y *Plumbago auriculata*, pero perjudicial para la *Calendula officinalis*. Además, el medio salino aplicado no impidió que la densidad foliar de las plantas de *Chrysanthemum morifolium* y *Plumbago auriculata* continúe desarrollándose de manera normal, por lo cual, estas dos especies tendrían éxito en la fitorremediación de suelos salinos contaminados con plomo.

Del presente estudio se concluye que las especies florales *Calendula officinalis* y *Plumbago auriculata* son las mejores especies para fitoextraer plomo y para la bioacumulación de cadmio son las especies *Chrysanthemum morifolium* y *Plumbago auriculata*.

5. Referencias bibliográficas

- Aransiola, S., Ijah, J., Abioye, O., & Bala, J. (2019). Microbial-aided phytoremediation of heavy metals contaminated soil: a review. *European Journal of Biological Research*, 9(2), 104-125.
- Chamba-Eras, I., Griffith, D., Kalinhoff, C., Ramírez, J., & Gázquez, M. (2022). Native Hyperaccumulator Plants with Differential Phytoremediation Potential in a Artisanal Gold Mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, 11, 1186.
- Liu, J., Zhou, Q., Sun, T., Ma, L., & Wang, S. (2008). Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics. *Journal of Hazardous Materials*, 151, 261-267.
- Mani, D., Sahu, V., & Singh, B. (2020). Bioaccumulation of As and Pb in pot marigold grown in sewage irrigated soils of Prayagraj, Uttar Pradesh, India. *Plant Archives*, 20(2), 5100-5106.
- Norleela Selemat, S., Rozaimah Sheikh Abdullah, S., & Idris, M. (2014). Phytoremediation of lead (Pb) and Arsenic (As) by *Melastoma malabathricum* L. from Contaminated Soil in Separate Exposure. *International Journal of Phytoremediation*, 16, 684-703.
- Ramana, S., Biswas, A., & Singh, A. (2013). Phytoremediation ability of some floricultural plant species. *Indian Journal of Plant Physiology*, 18(2), 187-190.
- Tokarz, K., Makowski, W., Tokarz, B., Hanula, M., Sitek, E., Muszynska, E., Jedrzejczyk, R., Banasiuk, R., Chajec, L., & Mazur, S. (2020). Can Ceylon Leadwort (*Plumbago zeylanica* L.) Acclimate to Lead Toxicity?—Studies of Photosynthetic Apparatus Efficiency. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(5), 1866.
- Zhang, C., Qian, J., Zhang, W., Lei, Y., Wang, S., Liu, J., & Zhang, C. (2020). Study on the remediation effect and environmental benefits of ornamental plants on heavy metal soil: a case study of Kaifeng City *Chrysanthemum*. *Environmental Chemistry*, (7), 1883-1893.

Red interconectada de áreas verdes para el mejoramiento ambiental del municipio de Cochabamba, Bolivia

Carmen Cruz¹, Paola G. Cruz¹, Pablo E. Prado^{1,2}, Marko Quiroga^{1,3}, Luis F. Aguirre⁴

¹Carrera Planificación del Territorio y Medioambiente, Facultad de Arquitectura y Ciencias del Hábitat, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

^{1,2}Unidad de Limnología Recursos Acuáticos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

³Centro de Planificación y Gestión, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

⁴Centro de Biodiversidad y Genética, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

²p.prado@umss.edu

Resumen

Cochabamba es un municipio integrante de la Región Metropolitana Kanata (RMK) que actualmente presenta diversos problemas socioambientales, entre los cuales están la contaminación, el crecimiento urbano no planificado y la disminución de áreas verdes y naturales. Las áreas verdes tienden a mejorar la calidad de vida de las personas, y al ser una parte importante del ecosistema urbano, contribuyen a la disminución de la contaminación de la ciudad. Este proyecto de investigación incluye el estudio de las áreas verdes dentro de los 15 distritos del municipio de Cochabamba. Los principales resultados demostraron que más del 50 por ciento de la superficie destinada a áreas verdes, cuenta con otro tipo de función distinta y por tanto no brindan óptimamente los servicios ecosistémicos de un área verde urbana. Se verificó que existe un déficit de la superficie de área verde por persona, que va empeorando año tras año. En este sentido, se podría implementar estrategias y acciones para encaminar la sustentabilidad del municipio de Cochabamba, a través de la recuperación de áreas verdes en todo el municipio, considerando la heterogeneidad de la ciudad en cuanto a sus características; el planteamiento de programas dirigidos a la conservación, consolidación y rehabilitación de áreas verdes capaces de ofrecer servicios ecosistémicos combinados como recreación, esparcimiento, mejoramiento ambiental, entre otros.

Palabras clave: *Áreas verdes, Servicios ecosistémicos, Sustentabilidad.*

Abstract

The municipality of Cochabamba is part of the Kanata Metropolitan Region (RMK). However, it currently presents various socio-environmental problems, such as pollution, unplanned urban growth, and a decrease in green and natural areas. Green areas improve people's quality of life, they are an important part of the urban ecosystem, and contribute to the reduction of pollution in the city. This research project includes the study of green areas within the 15 districts of the municipality of Cochabamba. The main results showed that more than 50 percent of the surface destined to green areas, fulfill different purposes and therefore do not provide the ecosystem services of an urban green area. It was verified that there is a deficit in the amount of green area per person, which is getting worse year after year. In this sense, strategies and actions could be implemented on behalf of the sustainability of the municipality of Cochabamba. Including the recovery and rehabilitation of green areas and conservation programs to improve ecosystem services such as recreation, enjoyment and environmental improvement, among others.

Key words: *Green areas, Ecosystem services, Sustainability.*

1. Introducción

Las áreas verdes juegan un importante rol en el mejoramiento de la calidad del ambiente urbano y por tanto en la calidad de vida de grandes aglomeraciones de personas que viven en ciudades (más del 50% de la población mundial desde 2008) y que según la tendencia de las pasadas cuatro décadas se estima que para el 2050 siete de cada diez personas en el mundo vivan en ciudades. (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019). Debido a este crecimiento urbano sin precedentes es que tanto los gobiernos y las instituciones están dirigiendo esfuerzos para encarar el reto de la sostenibilidad urbana en diversos escenarios, escalas y paradigmas de desarrollo.

El urbanismo ecológico aborda los retos de la sostenibilidad en la era de la información, debido a que las soluciones formales del urbanismo convencional del siglo XX no incorporan el conjunto de variables de los retos enunciados (Rueda, 2006). Además de concretar un conjunto de parámetros a escala de manzana. Esta ordenación permite abordar, con ciertas garantías, las variables relacionadas con la sostenibilidad en la sociedad del conocimiento. Si bien existen varios principios rectores para el urbanismo ecológico (Rueda, 2006), en el presente trabajo se tomó en cuenta como principios fundamentales: 1. Dotación de espacios verdes y biodiversidad; 2. Adaptación y mitigación al cambio climático; y 3. Cohesión social. De la misma manera, el urbanismo bioclimático tiene como objetivo la reducción al máximo de los impactos negativos que ejerce la urbanización sobre el medio, mediante zonas verdes adecuadas entre otros aspectos (Higueras, 2012).

Juntamente a los principios del urbanismo ecológico y bioclimático, en diversos países se han desarrollado instrumentos de gestión ambiental urbana, que se refiere al aprovechamiento, mejoramiento, conservación y estudio de la protección de los recursos naturales, en relación al bienestar social, económico y cultural para beneficio de la calidad de vida de las personas. En este sentido, se han incorporado conceptos y políticas ecológicas en los procesos de planificación de las ciudades, entre los cuales se encuentran la infraestructura ecológica o verde, el mantenimiento de áreas verdes o parches de vegetación y la implementación de corredores naturales o biológicos al interior de la ciudad (Prado-

Velasco, 2006). Por otra parte, existen programas sostenibles de manejo de áreas verdes urbanas para preservar los sistemas naturales e integrar la naturaleza en la planificación de las ciudades, ya sea mediante parques o corredores verdes, humedales o cuencas hidrográficas protegidas que proveen hábitat a la fauna silvestre, o terrenos agrícolas que preserven la variedad del paisaje (Sorensen *et al.*, 1998).

La infraestructura verde es definida como una red interconectada de espacios verdes urbanos, periurbanos, rurales y silvestres, que conserva y aporta funciones ecosistémicas y servicios ambientales para la población humana (Benedict & McMahon, 2006). Debido a sus características tipológicas, es un sistema complejo de estructuras que facilitan la recuperación y generación de espacios públicos verdes y beneficios relacionados con la preservación del ambiente urbano, la conservación de los recursos naturales, la integración paisajística, el desarrollo social y cultural de los individuos y la preservación de la salud pública, conjugados en un concepto de ciudad ambiental y arquitectónicamente sostenible (Fadigas, 2009. Mena *et al.*, 2011. Moreno *et al.*, 2014). Para lograr la integración e interconexión de la infraestructura verde urbana una de las estrategias de gestión ambiental urbana es la identificación y establecimiento de corredores biológicos urbanos.

Los corredores biológicos son importantes elementos que suelen desarrollarse en paisajes fragmentados y que son vulnerables al impacto humano y al cambio climático. Su objetivo fundamental es restablecer y mantener la conectividad en el paisaje. Es decir, que buscan contribuir a incrementar las especies silvestres, así como la continuidad de los procesos ecológicos clave en la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la vida en una ciudad (Canet-Desanti *et al.*, 2012). Similarmente, el Proyecto de Corredores Biológicos Urbanos, Servicios Ecosistémicos y Equidad, para el Municipio de Cochabamba, define a los corredores urbanos como cualquier espacio identificable y usado por una especie que facilita el movimiento de animales o plantas en el tiempo, entre dos o más parches de hábitat separados (Aguirre *et al.*, 2020)

Algunos ejemplos de ciudades latinoamericanas que aplicaron estrategias, proyectos y acciones para gestionar sus áreas verdes e infraestructura verde son: 1) el sistema de áreas verdes del Municipio de

La Paz, Bolivia (2006), para elevar la calidad de vida de la sociedad y mejorar la imagen de la ciudad. 2) El proyecto de Rehabilitación de espacios verdes urbanos de Xalapa, México (2014), propiciando así el acercamiento de las personas a la naturaleza. 3) El Programa de Bosques Urbanos y Espacios verdes de la CAF, varias ciudades de Brasil (2016), tiene como objetivo el Mejoramiento y Rehabilitación de espacios verdes a través del incremento de superficie y calidad de las áreas verdes con el componente de Bosques Urbanos en las ciudades. 4) La Propuesta de tipología de corredores para la Estructura Ecológica Principal de Bogotá, Colombia (2006), para disminuir la pérdida de biodiversidad y mejorar la sostenibilidad de recursos naturales. 5) Plan Maestro de áreas verdes y espacio público de la Comuna de Coronel, Concepción, Chile (2012) para la implementación de un modelo de gestión del espacio público y elevar la cantidad de áreas verdes. En suma, la revisión de las experiencias citadas anteriormente da noción de algunos componentes fundamentales adaptables al presente caso de estudio, a saber: a) Arbolado urbano y áreas verdes lineales; b) Espacios recreativos y Áreas verdes ecológicas (Naturaleza); c) Consolidación y rehabilitación de áreas verdes; d) Calidad paisajística (ecología del paisaje); e) Bosques urbanos; f) Interconexión de Corredores Biológicos Urbanos.

El Municipio de Cochabamba es el centro urbano más importante del Departamento del mismo nombre y sus áreas verdes representan un importante componente natural que cumplen múltiples beneficios sociales y ambientales para los residentes urbanos. La problemática en este municipio se origina con el crecimiento urbano y la débil consolidación de planes regionales de desarrollo, según el Plan Director de la Región Urbana de Cochabamba (1981), lo que ha ocasionado un escenario de insuficiencia en la gestión integral de las áreas verdes como elementos estructurantes del territorio y de los sistemas de vida de la región. Por lo tanto, es necesario generar conocimiento científico actualizado, profundidad del análisis y la formulación de acciones que ayuden a solucionar los problemas mencionados.

En este trabajo, se analiza el estado de las áreas verdes en el municipio de Cochabamba, con un enfoque integral, cuali-cuantitativo y desde el punto de vista de funciones ambientales. El objetivo principal busca plantear una estrategia pertinente y priorizada de áreas

verdes para la articulación funcional, el mejoramiento ambiental y la conectividad en la estructura verde del Municipio de Cochabamba.

2. Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio fue desarrollado en la zona urbana de la ciudad de Cochabamba, Provincia Cercado, Departamento de Cochabamba, Bolivia. Dicha zona tiene una superficie de 13.848,79 ha sobre una extensión territorial municipal de 32.253,84 ha, equivalente a 322,50 km². El municipio está conformo por 15 distritos, de los cuales el distrito 13 es parte del Parque Nacional Tunari (GAM Cochabamba, 2016-2020). De acuerdo al Censo Nacional de Población y Vivienda realizado el año 2012, existe una población total de 632.013 habitantes dentro del área urbana del municipio de Cochabamba (Instituto Nacional de Estadística, 2015)

Levantamiento y procesamiento de la información de las áreas verdes

Se realizó la identificación de las áreas verdes establecidas en el Plan Territorial de Desarrollo Integral (PTDI) mediante la clasificación hecha por el instrumento técnico del Plan Maestro de Forestación y Reforestación del año 2016, sobre las condiciones actuales y cuantificación de las áreas verdes.

Tabla 1

Clasificación y Cantidad de las Áreas Verdes dentro el Municipio de Cochabamba con base en el Plan Territorial de Desarrollo Integral del Municipio Cochabamba 2016-2020 y el Plan de Forestación y Reforestación del Municipio de Cochabamba

Distritos	Parques	Plazas y Plazuelas	Áreas de forestación y prevención ecológica	Áreas Verdes ligadas a la Infraestructura Vial	Total	%
D1	17	21	68	34	140	3,7%
D2	33	28	47	111	219	5,7%
D3	14	25	7	105	151	4,0%
D4	9	29	10	60	108	2,8%
D5	33	24	7	71	135	3,5%
D6	6	20	2	48	76	2,0%
D7	14	16	17	11	58	1,5%
D8	24	12	104	110	250	6,5%
D9	4	15	13	63	95	2,5%
D10	4	31	7	106	148	3,9%
D11	13	16	4	60	93	2,4%
D12	43	37	5	108	193	5,1%
D14	17	12	2	23	54	1,4%
D15	5	9	10	33	57	1,5%
SUB TOTAL	236	295	303	943	1777	46,5%
%	6,2%	7,7%	7,9%	24,7%	46,5%	
TOTAL					3821	100,0%

Se realizó una validación de campo mediante observación directa para verificar el uso actual y reclasificar, de ser necesario, los tipos de áreas verdes según las características en cada distrito.

Para la caracterización de las áreas verdes urbanas a nivel de distrito se aplicaron 12 variables (ver Tabla 2),

las 10 primeras son parámetros ambientales y físicos, mientras que las restantes dos son de percepción social relevadas mediante encuesta. El cálculo de la muestra (384 encuestas) fue realizado mediante la fórmula de población finita con base en la población total del municipio proyectada al año 2020 de acuerdo a datos del PTDI 2016 – 2020 del municipio de Cochabamba.

Tabla 2

Variables empleadas en el estudio con base en el diagnóstico de las áreas verdes del municipio de Cochabamba

1. Norma de cesión de área verde:	Según la normativa la cesión de las áreas verdes debería ser el 17,3% del área urbana. Cálculo de la superficie urbana por distrito correspondiente a cesión por norma.
2. Clasificación de área urbana:	Cuantificación de áreas verdes existentes con base en imágenes de satélite de alta resolución (< 1m) del año 2020.
3. Superficie de Área verde:	El cálculo de cada área verde se realizó a través de la superficie de sus polígonos vectoriales, con la ayuda de las herramientas de sistemas de información geográfica disponibles en QGIS y ArcGIS. Unidad: m ²
4. Cobertura territorial de un área verde:	La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece 300 metros de distancia de un área verde hacia a la vivienda de un habitante. Cálculo de las distancias en línea recta desde cada área verde mediante herramientas SIG.
5. Capacidad de áreas verdes por habitante:	La identificación del indicador de superficie (m ²) de área verde por habitante depende del tipo de ciudad y sus características, los niveles socioeconómicos de los habitantes y al tipo de sociedad, (Mena et al., 2011). La sumatoria total de áreas verdes consolidadas existentes en el municipio se divide sobre el total de la cantidad de habitantes, que tiene por resultado la superficie en m ² por persona.
6. Uso de suelo actual de las áreas verdes:	Identificación de cada área verde y el estado actual de su diferente uso, obteniendo así cuatro categorías: Residencial, Sin consolidar, Cancha deportiva y otros equipamientos.
7. Mantenimiento a las áreas verdes consolidadas:	Con base en la información proporcionada por la empresa municipal “EMAVRA” sobre el número de áreas verdes que cuentan con el servicio de mantenimiento, verificando mediante datos de una encuesta de percepción sobre el conocimiento que tiene la población acerca del mantenimiento de sus áreas verdes.
8. Accesibilidad de Áreas Verdes:	Con base en la información proporcionada por la empresa municipal “EMAVRA” sobre el número de áreas verdes que tienen libre acceso, acceso restringido por pago u otro tipo de restricción.
9. Funcionalidad de Áreas Verdes:	Mediante la superposición de los polígonos de áreas verdes sobre el índice normalizado de vegetación obtenido de la imagen satélite Sentinel 2 de julio de 2021, se determina la cantidad que cuenta con vegetación y sin vegetación.
10. Áreas Naturales:	Se realizó la cuantificación de las áreas naturales presentes en el territorio del municipio, ya que representan espacios importantes para la continuidad de los procesos ecológicos, biológicos y para la conservación del ecosistema.
11. Percepción sobre las Áreas verdes:	Se obtuvo los datos de esta variable mediante una encuesta sobre una muestra representativa calculada a través de la fórmula para una población finita. 14 preguntas de las cuales 8 fueron dicotómicas y 6 politómicas.
12. Afluencia a las áreas verdes:	Se obtuvo los datos de esta variable mediante la encuesta mencionada en la fila anterior. Las preguntas sobre frecuencia y tipo de personas que asisten fueron las que proporcionaron datos para esta variable.

3. Resultados

A continuación, se representa los principales hallazgos para cada una de las variables estudiadas.

Norma de cesión de área verde: Ningún distrito cuenta con el porcentaje mínimo de cesión de área verde, siendo mayor el déficit en los distritos de la zona sud respecto a los distritos de la zona norte.

Clasificación de área urbana: Los distritos 1,2,3,10 y 12 cuentan con más áreas verdes consolidadas y clasificadas en parques, plazas, plazuelas, áreas verdes ligadas a la infraestructura vial y áreas de forestación

y prevención ecológica, con base en el Plan maestro de forestación y reforestación de Cochabamba.

Superficie de Área verde (m²): Solo el 5 % de la superficie total del municipio es área verde. Los distritos 8, 9 y 15 de la zona sud tienen más superficie de área verde con otro tipo de función distinta a la ambiental.

Cobertura territorial de un área verde: Se calculó el área de influencia o cobertura territorial a 300 m de distancia en línea recta a partir de las áreas verdes consolidadas (Reyes & Figueroa, 2010), encontrando que los distritos 8,9,14 y 15 no cuentan con suficiente cobertura territorial de áreas verdes.

Capacidad de áreas verdes por habitante: Se dividió la superficie total de áreas verdes a nivel distrital entre la proyección de población al año 2020 para obtener la cantidad de m² de área verde por persona. Los distritos 3,4,6 y 11 tienen las menores cantidades de área verde por persona.

Uso de suelo actual de las áreas verdes: La cantidad de superficie con otra función distinta dentro del área verde asciende a 53,5% del total, es decir más de la mitad de las áreas verdes municipales no cumplen la función para la cual fueron planificadas.

Mantenimiento a las áreas verdes consolidadas: El 36,8% de las áreas verdes son mantenidas por la empresa municipal EMAVRA de las cuales 13,7 % son recurrentes (áreas que tienen mantenimiento constante) y el 23,1% de las áreas verdes no son recurrentes.

Accesibilidad de Áreas Verdes: Para esta variable se tomó en cuenta las áreas verdes clasificadas como parques, plazas y plazuelas con libre acceso. Existen un total de 531 áreas verdes de las cuales 496 son de libre acceso (93,41 %), 28 áreas verdes tienen restricción de acceso en distintos horarios (5,27 %) y 7 presentan acceso controlado mediante pago (1,32 %).

Funcionalidad de Áreas Verdes: De un total de 46,5 % de áreas verdes consolidadas, el 28,3% cuenta con

vegetación y el 18,2% no cuenta con ningún tipo de vegetación, es decir que no todas las áreas verdes consolidadas brindan suficientemente servicios ecosistémicos, reduciendo así los beneficios para la población.

Áreas naturales: Se tomó en cuenta a las áreas naturales compuestas por quebradas (torrenteras), espacios circundantes a lagunas y otras áreas naturales con potencial de ser áreas verdes consolidadas y así ayudar a reducir el déficit de superficie de área verde por persona que existe y ayudar a cumplir la norma de cesión establecida para el municipio.

Percepción sobre las Áreas verdes: Mediante las encuestas realizadas a la población cochabambina sobre su percepción acerca de las áreas verdes, se encontró que el 84,9 % de la población encuestada no se siente segura en su área verde más cercana. Un 79% opina que la inseguridad de su área verde es el problema más frecuente. El 93.8% de la población cree que sus áreas verdes están deterioradas.

Afluencia a las áreas verdes: La población que asiste con mayor afluencia a sus áreas verdes son personas jóvenes. Con una frecuencia ocasional, feriados y fines de semana.

En la Tabla 3 se presenta los resultados de las anteriores variables a nivel de distrito.

Tabla 3

Evaluación de las 10 variables físico ambientales con base en datos proporcionados por EMAVRA y relevamiento del año 2021

DISTRITOS	Norma de Cesiones	Superficie de áreas verdes				Capacidad de áreas verdes por habitante	Índices de áreas verdes			Uso de suelo actual de áreas verdes		Mantenimiento	Accesibilidad	Función Ambiental							
		Déficit absoluto (Cesión s/norma o Cesión s/relevamiento)	Superficie de área verde	Sup. de área verde consolidada	Sup. de área verde con otra función		Superficie AAVV/Sup. Total	m ² de AAVV por hab. 2020	Índice del total de áreas verdes	Índice de área verde consolidada	Índice de área verde con vegetación			Residencial	Sin Consolidar	Recurrentes	No Recurrentes	Libre Acceso	Con Restricción	Con Vegetación	Sin Vegetación
1	32,93	738540,92	539047,11	1994,94	11,97%	19,43	19,43	14,18	1,12	11	53	35	68	38	128	13					
2	52,36	1325126,77	1128630,71	196496,06	12,40%	17,09	17,09	14,56	3,97	9	57	68	134	61	2	192	27				
3	165,67	337925,66	229644,35	108281,30	2,93%	4,61	4,61	3,13	1,55	3	54	48	78	39	76	72					
4	85,24	477291,98	382977,54	94314,44	6,21%	8,37	8,37	6,71	4,56	5	18	52	104	36	2	66	42				
5	120,89	601379,01	483258,15	118120,86	5,75%	10,89	10,89	8,75	2,56	5	33	64	91	53	4	74	61				
6	123,43	326319,99	243829,40	82490,59	3,62%	6,77	6,77	5,06	0,83	2	26	20	49	25	1	29	47				
7	35,36	287652,38	194659,66	92992,72	5,52%	12,83	12,83	8,68	1,96	9	32	15	24	29	1	27	31				
8	37,62	3072497,53	1692918,78	1379578,75	10,96%	27,35	27,35	15,07	0,38	36	240	5	18	21	16	35	215				
9	-61,06	2824344,97	250089,20	2640790,91	2,25%	13,54	13,54	1,20	0,22	177	688	3	40	19	1	33	63				
10	51,51	404143,72	360787,28	43356,44	7,61%	11,57	11,57	10,33	6,94	11	11	59	72	27	2	131	18				
11	42,99	306234,58	301132,41	5102,17	5,12%	12,00	12,00	11,80	4,97	11	2	46	54	28	1	89	4				
12	80,64	518674,85	496770,73	22248,70	6,77%	10,71	10,71	10,26	9,89	8	8	107	119	77	2	175	18				
14	20,75	647848,41	293140,86	356153,07	9,32%	15,55	15,55	7,04	0,37	12	147	3	20	29	1	17	37				
15	107,95	1926421,40	159243,99	1768426,23	7,88%	60,47	60,47	5,00	0,37	59	230	10	14	2	11	46					
Total	896,27	13794402,20	6756130,20	6910347,18	7,02%	15,76	15,76	7,72	2,19	347	1599	525	881	496	35	1083	694				

Tabla 4

Percepciones ciudadanas respecto a las áreas verdes del municipio de Cochabamba, 2021

DISTRITOS	sexo		¿con qué frecuencia asiste usted a las áreas verdes de su zona o barrio?					¿quiénes usan frecuentemente el área verde de su zona o barrio?				¿se siente seguro en sus áreas verdes?		¿qué problemas sociales se ven con mayor frecuencia en su área verde?		
	femenino	masculino	total, general	feriados	fines de semana	ocasionalmente	todos los días	adultos	adultos mayores	jóvenes	niños	no	si	alcoholismo	delincuencia	inseguridad
1	7	6	13	1	4	8			1	5	7	10	3	2	3	8
2	5	8	13	2	2	9				4	9	10	3	3		10
3	2	2	4	1	1	2				3	1	3	1		1	3
4	4	6	10	3	3	4		3		5	2	5	5	5	1	4
5	14	13	27	5	5	17			3	12	12	25	2	6	7	14
6	11	12	23	6	7	10		8		10	5	19	4	5	2	16
7	10	9	19	4	9	6		1		11	7	19		2	7	10
8	14	29	43	11	11	20	1	3	2	11	27	38	5	6	9	28
9	55	40	95	30	23	38	4	12	1	40	42	81	14	18	21	56
10	7	12	19	4	10	5		3		14	2	16	3	2	6	11
11	8	4	12		3	6	3		2	8	2	8	4	2	5	5
12	18	13	31	8	8	11	4	3	2	22	4	21	10	6	3	22
14	15	31	46	16	14	13	3	8	2	19	17	45	1	6	4	36
15	18	11	29	11	7	10	1	2	1	7	19	26	3	2	4	23
Total	188	196	384	80	107	159	16	43	14	171	153	326	58	65	73	246

En la Tabla 4 se presenta un resumen de las encuestas realizadas mediante una boleta configurada en un formulario de *Google forms*, sobre la percepción de la población respecto las áreas verdes.

El mapa presentado en la Figura 1 muestra el diagnóstico de las áreas verdes municipales. La zona

sud del municipio presenta las mayores deficiencias, aunque cuenta con áreas verdes, sin embargo, éstas carecen de vegetación e infraestructura. Las áreas verdes no consolidadas se muestran en el tono más oscuro.

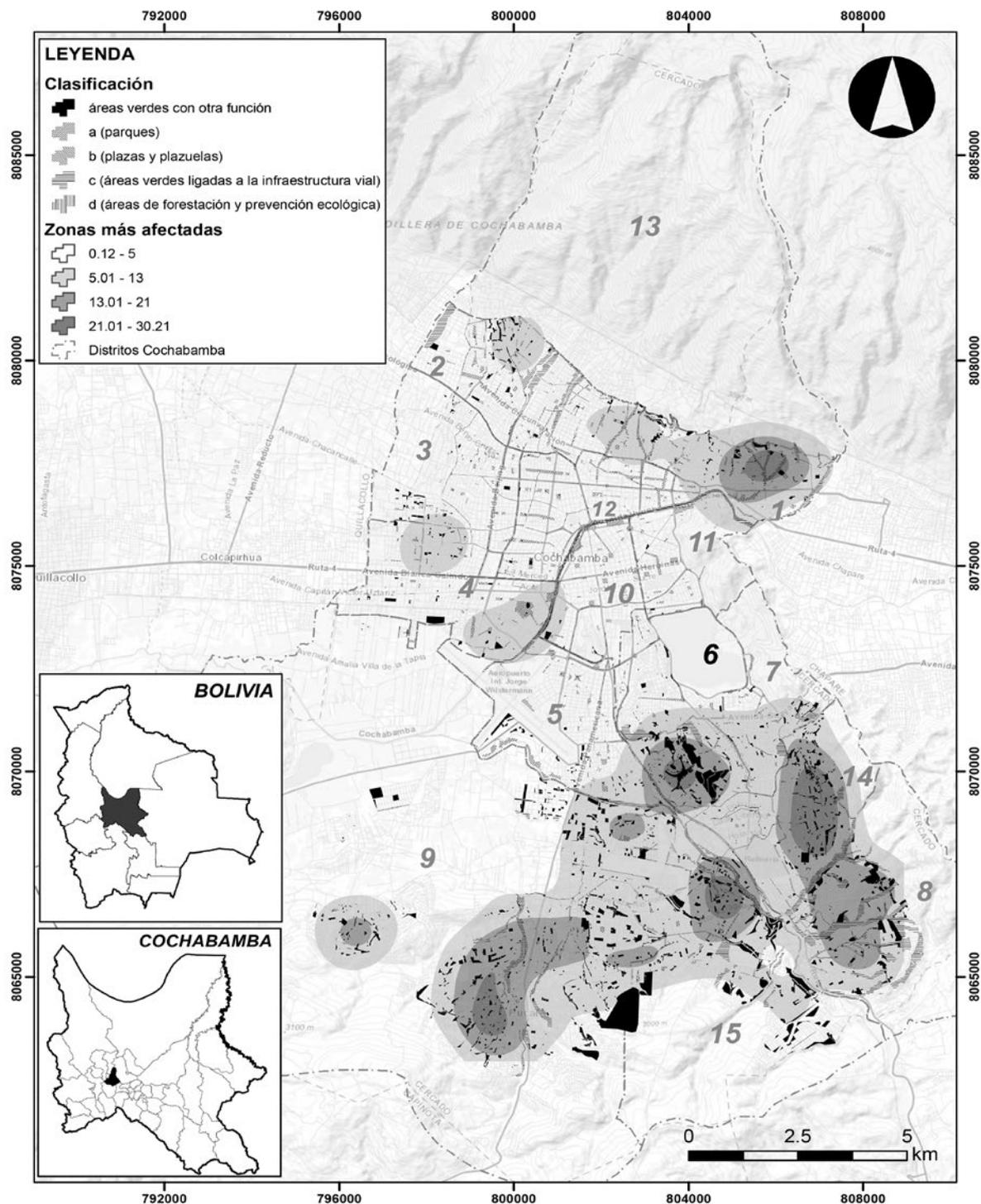


Figura 1. Diagnóstico de las áreas verdes del Municipio de Cochabamba elaborado con base en el Plan Maestro de Forestación y Reforestación del Municipio de Cochabamba, 2021.

4. Discusión

La información recolectada permitió conocer las características físico espaciales y funciones que cumplen las áreas verdes dentro el municipio de Cochabamba, donde se evidenció que la situación

actual de las áreas verdes posee marcadas diferencias en cuanto a las cantidades, superficies y características en dos tipos de zonas. La zona norte cuenta con mayor cantidad de áreas verdes consolidadas que tienen vegetación; respecto a la zona sur, que cuenta con

menos áreas verdes y con poca vegetación en sus áreas verdes consolidadas, además con un mayor riesgo de ser fraccionadas al ser simplemente espacios libres, debido a presiones del mercado de suelo o la ocupación con distintos equipamientos urbanos. Constituyéndose en una aproximación cercana al modelo de ciudad dual con fragmentación espacial y segregación (Castells, 1995) que incluye desigualdades en el acceso a servicios, áreas verdes, etc. En contraposición, una ciudad sostenible debe respetar y valorizar la base geográfica natural y los ciclos climáticos y biológicos; debe lograr la capacidad de recuperarse rápidamente de los impactos que sufre, pudiendo resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de manera oportuna y eficiente, lo que incluye la preservación y restauración de sus estructuras y funciones básicas (Corti, 2019).

La situación actual de desequilibrio de la cantidad de áreas verdes en las distintas zonas de la ciudad de Cochabamba, podría ser un efecto de una ausencia de políticas públicas referidas a priorizar los espacios verdes y la funcionalidad de la estructura ecológica del Municipio, en concordancia a la ausencia o deficiencia de mecanismos efectivos de

Tabla 5

Resumen de las propuestas de acciones estratégicas para el mejoramiento de las características ambientales de la red de interconexión en el municipio de Cochabamba

Componentes	Directrices	Objetivos Estratégicos
1) Arbolado urbano y áreas verdes lineales	1) El arbolado urbano existente en las aceras y jardinerías centrales deberá ser conservado y donde haga falta deberá ser incrementado con especies nativas, en especial en los distritos 8, 9, 14 y 15.	1.1. Conservar y mantener el arbolado urbano existente en las aceras y jardinerías centrales de los distritos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11 y 12 1.2. Incrementar el 28.3% de arbolado urbano en las aceras y jardinerías centrales de los distritos 8, 9, 14 y 15 hasta el 2026 (5 años)
2) Espacios recreativos y Áreas verdes ecológicas (Naturaleza)	2) Las áreas verdes ecológicas deben ser implementadas en áreas con potencial a convertirse en áreas verdes consolidadas	2.1. Implementar áreas verdes ecológicas en los espacios asociados a las Lagunas: coña coña, Alalay, Albarrancho, Quenamari, y en las quebradas (torreteras): Zona Norte (Arocagua mayu, Pintu mayu Blanco Loma, Ichuloma, Thajho, tupuraya, tajra, sotomayu), Zona sud (Chaquimayu)
3) Consolidación y rehabilitación de áreas verdes	3) En el Municipio todas las áreas verdes sin consolidar deberán ser consolidadas principalmente con vegetación.	3.1. Consolidar el 41,8 % de áreas verdes no consolidadas hasta el 2023, mediante la adecuación de nuevas áreas verdes mixtas (parques, plazas y plazuelas) para la consolidación y rehabilitación
4) Calidad paisajística (ecología del paisaje)	4) Cada sitio de área verde debe priorizar y conservar las funciones tanto ambientales, recreativas y paisajísticas	4.1. Priorizar el mantenimiento en todas las áreas verdes consolidadas para reducir la inseguridad que percibe la población (sistemas de vigilancia y promoción de actividades culturales) 4.2. Implementar la presencia de cinturones verdes en serranías
5) Bosques urbanos	5) Los bosques urbanos deben ser una prioridad tanto en su implementación en áreas reservadas para este fin, como en áreas que potencialmente podrían convertirse en bosques urbanos.	5.1. Consolidar los parques urbanos con potencial de convertirse en bosques urbanos como Champarrancho (55 ha) 5.2. Implementar bosques urbanos en áreas de remediación ambiental como el Botadero de Kara Kara (53 ha), luego de su cierre y reubicación de un nuevo botadero.
6) Interconexión de Corredores Biológicos Urbanos	6) Se dará prioridad a la interconexión de corredores biológicos urbanos, mediante la consolidación de áreas verdes y la implementación de nuevas áreas verdes.	6.1. Interconectar la zona norte y sud del municipio mediante los patrones lineales es decir las áreas verdes ligadas a la infraestructura vial de vías principales y a la proximidad de ríos conjuntamente con la implementación de nuevas áreas en los distritos 8,9,14 y 15

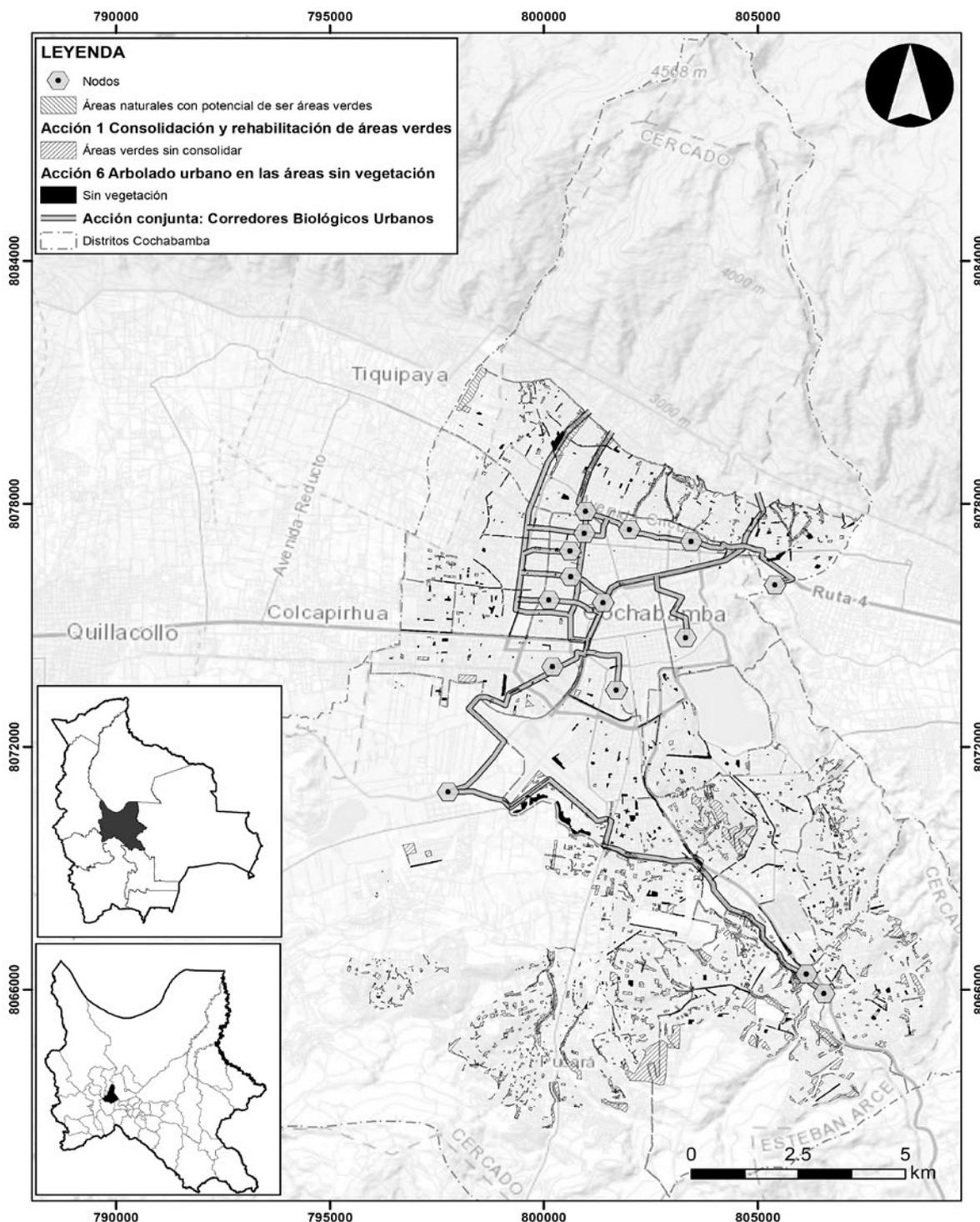


Figura 2. Resumen de la propuesta de manejo de áreas verdes para el Municipio de Cochabamba con base en el diagnóstico y las acciones estratégicas, 2021.

La propuesta de manejo de áreas verdes urbanas, incluye los tipos de participación, así como apoyo social, apoyo político, viabilidad técnica y sostenibilidad ambiental que permitan contrarrestar los problemas ambientales del área de estudio; para

la rehabilitación, incorporación y mantenimiento de áreas verdes urbanas, optimizando la gestión ambiental de las mismas, brindando un considerable aporte en el proceso de desarrollo sostenible del Municipio de Cochabamba.

La propuesta considera los espacios planificados como áreas verdes no consolidadas y también los espacios naturales asociados a quebradas y lagunas que podrían ser mejorados en su cobertura vegetal y mantenimiento. En integración, con corredores verdes o biológicos que son una estrategia eficaz para contrarrestar los efectos de la fragmentación ecológica y contribuir a la sostenibilidad urbana en ambientes altamente antropizados (Teng *et al.*, 2011). En la Figura 2 se muestra la propuesta de las directrices estratégicas 1,2 y 6.

5. Conclusiones

Las variables de investigación evidenciaron diferencias entre las condiciones ambientales que existen en la zona norte y la zona sud del municipio. Se logró caracterizar la situación actual de las áreas verdes en el Municipio de Cochabamba, la cual demuestra la falta de atención a las mismas, un deterioro considerable y la falta de áreas verdes en determinadas zonas de la ciudad. Se verificó satisfactoriamente la aplicabilidad de las variables como insumo para el diagnóstico en beneficio de la gestión ambiental sostenible del ecosistema urbano del municipio.

En cumplimiento del objetivo del estudio, se propuso una estrategia de manejo de las áreas verdes urbanas, estructurada en componentes, directrices, objetivos y acciones. Se realizó también una estimación del tiempo y el presupuesto para la ejecución y mantenimiento del proyecto, es decir la implementación de la estrategia.

Las áreas verdes urbanas interconectadas mediante corredores biológicos urbanos ofrecen grandes oportunidades para el cambio positivo y el desarrollo sostenible del municipio de Cochabamba. Los espacios verdes públicos accesibles para caminar, circular en bicicleta, jugar y realizar otras actividades al aire libre pueden favorecer una mayor calidad de vida para las personas. En este sentido, la necesidad de la población de espacios verdes requiere la efectiva gestión o manejo de las áreas verdes, que contengan vegetación adecuada al sitio, en buen estado de conservación y que requieran bajo mantenimiento.

La ciudad debe, por tanto, proyectarse integralmente para el bienestar de sus habitantes y los valores que representan al medio ambiente y la naturaleza tengan una significativa preponderancia. La diversidad urbana compuesta por matices, representaciones y actividades, plantea una infinidad de oportunidades

para un desarrollo integral con sostenibilidad, equidad y justicia ambiental para toda su sociedad. En el entendido que cuanto mayor cantidad y calidad de áreas verdes existan en la ciudad mayor será la calidad de vida para las personas.

Agradecimientos

Agradecemos a los investigadores, instituciones y personas asociadas el Proyecto de Investigación de Corredores Biológicos Urbanos, Servicios Ecosistémicos y Equidad, Municipio de Cochabamba (PIA-ACC II - 8) por la colaboración al presente proyecto y a la Cooperación Suiza en Bolivia (COSUDE) por el financiamiento del proyecto PIA-ACC II - 8. Así como al personal de la Empresa Municipal de Áreas Verdes y Recreación Alternativa del Municipio de Cochabamba que nos han ayudado con la información relacionada a las áreas verdes del área de estudio.

6. Referencias bibliográficas

- Aguilar R., De la Fuente J., Mercado J., Miranda W. y Montaña O. (1981). Plan Director de La Región Urbana de Cochabamba. CORDECO.
- Aguirre, L. F., Campero, M., Flores, C. O. C., Delgado, R., Rejas, D., Ricaldi, T., Rico A., Prado-Velasco, P.E., Veizaga-Rosales J.M., Bellot, N., Lara, J.S., Galarza, I., Saavedra, L., Gareca, E., Cahill, J., Arrázola, S., Mercado, M., Fernandez, C., Rivero, M., Ayma, A., Fajardo Pozo, J. P. (2022, December 7). Corredores Biológicos Urbanos de Cochabamba. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/EZDKX>
- Benedict, M., McMahon, E. (2006). Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities. Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press. 22.
- Canet-Desanti, L., Herrera-Fernandez, B., & Finegan, B. (2012). Efectividad de Manejo en Corredores Biológicos: el caso de Costa Rica. *Revista Parques*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/309549197_Efectividad_de_manejo_en_corredores_biologicos_el_caso_de_Costa_Rica
- Castells, M. (1995). La ciudad informacional. Tecnologías de la información, reestructuración económica y el proceso urbano-regional. Madrid: Alianza

- Corti, M. (2019). *Diez principios para ciudades que funcionen*. Buenos Aires: Café de las Ciudades.
- Fadigas, L. (2009). La Estructura Verde en el Proceso de Planificación Urbana. *Ciudades*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/321464901_La_estructura_verde_en_el_proceso_de_planificacion_urbana
- GAM Cochabamba. (2016-2020). *Plan Territorial de Desarrollo Integral del Municipio de Cochabamba*. Cochabamba.
- Gámez Bastén, Vicente. (2005). *Sobre sistemas, tipologías y estándares de áreas verdes en el planeamiento urbano*. Revista Electrónica DU&P. Diseño Urbano y Paisaje Volumen II N°6. Centro de Estudios Arquitectónicos, Urbanísticos y del Paisaje
- Higueras García, E. (2012). *Urbanismo Bioclimático*. Madrid: GG.
- Instituto Nacional de Estadística. (2015). *Cochabamba, Censo de Población y Vivienda 2012*. INE.
- Loza A., Torrez G., Vargas F. y otros (2019). Kunturillo, Recuperación y Recualificación del Río Rocha, Fase 1 Análisis de Situación. UMSS. ISBN: 978-99974-0-779-5.
- Mena, C., Ormazabal, Y., Morales, Y., Santelices, R., & Gajardo, J. (2011). Índices de área verde y cobertura vegetal para la ciudad de Parral (CHile), mediante fotointerpretación y SIG. *Ciencia Florestal*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/277105545_Indices_de_area_verde_y_cobertura_vegetal_para_la_ciudad_de_Parral_Chile_mediante_fotointerpretacion_y_SIG
- Moreno, O., Lillo, C., & Gárate, V. (2014). La infraestructura verde como espacio de integración. La Plata. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/53434>
- Prado Velasco, P. E. (2006). *Lineamientos para la puesta en valor de la estructura (verde) ecológica de la Ciudad de Cochabamba (Municipio de Cercado)*. doi:10.13140/RG.2.2.10408.21767
- Remolina, F. (2006). Propuesta de tipología de corredores para la Estructura Ecológica Principal de Bogotá. *Revista nodo N° 1*, 13-20. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/277266440_Propuesta_de_tipologia_de_corredores_para_la_Estructura_Ecologica_Principal_de_Bogota
- Reyes Pácke, S., & Figueroa Aldunce, I. M. (2010). Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile. *EURE*.
- Rueda, S. (2006). El Urbanismo Ecológico. Un nuevo urbanismo para abordar los retos de la sociedad actual. Retrieved from <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/UrbanismoEcologicoSRueda.pdf>
- Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K., & Williams, J. (1998). *Manejo de las áreas verdes urbanas*. Washington.
- Teng M, Wu Ch, Zhou Z, Lord E, Zheng Z. (2011) *Multipurpose greenway planning for changing cities: A framework integrating priorities and a least-cost path model*. Landscape Urban Planning.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. New York: United Nations.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Todos los manuscritos sometidos a la **REVISTA FACULTATIVA CIENCIA Y TECNOLOGÍA** deben ser entregados en formato digital DOC o RTF para hojas tamaño carta, con márgenes de 2,5 cm. Todas las páginas deben ser numeradas de manera consecutiva en el ángulo superior derecho, y las líneas deberán ser numeradas junto al margen izquierdo, en todo el trabajo. Deben llevar *i*) una carátula – indicando el título, su(s) autor(es), afiliación y dirección (institucional), resumen y palabras clave- *ii*) el texto del manuscrito y *iii*) los agradecimientos, la lista de referencias bibliográficas, las tablas y figuras.

Los **artículos científicos** están basados en una investigación completa, presentan datos originales, y organizan su texto bajo los títulos primarios de: introducción, métodos, resultados y discusión (con conclusiones o recomendaciones opcionales). Los **artículos de divulgación científica o de interés institucional**, son más flexibles en su estructura y pueden mantener algunos títulos principales (introducción, discusión) e incorporar otros. El texto normal de todos los manuscritos debe usar letra Times New Roman 12 puntos, a 1,5 espacios entre líneas y justificado a la izquierda, pero en tablas complejas puede reducirse a 10 puntos e interlineado simple. El uso de letra cursiva se restringirá a palabras en latín u otro idioma. La extensión máxima de los artículos científicos será de 25 páginas (contando referencias, figuras y cuadros). La extensión máxima de los artículos de divulgación será de 15 páginas.

Las cifras con cuatro o más dígitos llevarán punto como separador de mil (2.500 m), excepto en los años. El separador decimal es la coma.

Para todas las unidades utilice el sistema métrico internacional (Système International d'Unités, SI).

Título: ilustrativo del contenido, conciso.

Autor(es): nombre(s) y apellido(s) de cada uno, indicando con un superíndice numerado su respectiva afiliación y dirección institucional, y dirección de correo electrónico.

Resumen: hasta 250 palabras en un solo párrafo; debe dar una reseña informativa de objetivos, métodos, resultados y las principales conclusiones. No debe incluir citas bibliográficas.

Palabras clave: 5 términos compuestos o simples, que no repiten los del título, ordenados alfabéticamente.

Abstract: resumen en idioma inglés.

Key words: Palabras clave en idioma inglés.

Texto: dividido en secciones principales - introducción, métodos, resultados, discusión, agradecimientos y referencias bibliográficas- u otras más adecuadas a la estructura de artículos de divulgación, ensayos o revisiones- las que llevan formato de título primario (ej. DISCUSIÓN, en mayúscula y negrita). Los títulos secundarios e inferiores deberán distinguirse de manera fácil y consistente por su estilo a lo largo del texto, y no estarán numerados. Los niveles de subtítulos deben mantenerse al mínimo, y ser consistentes entre secciones.

Citas bibliográficas: establecen la autoría de los datos o ideas ajenas mencionadas en el texto (en introducción, métodos o discusión), en tablas o figuras. Permiten buscar la fuente original que debe estar listada al final en **referencias bibliográficas**. Usar estilo APA sexta edición. Se recomienda utilizar un gestor de referencias (Por ejemplo, Mendeley)

Cuadros: Los cuadros se deben incluir al final del texto, cada uno en una hoja separada y precedidos por su leyenda. En el texto, se debe señalar el lugar aproximado donde se insertará cada cuadro. Deben presentarse como tablas de Word, sin líneas verticales, y deben contar con título y encabezados (de columnas y filas).

Figuras: pueden ser mapas, gráficos, dibujos o fotos. Deben estar impresas en páginas separadas al final del manuscrito y contar con sus respectivas leyendas. Los detalles de dibujos y gráficos (letras, símbolos) deben ser legibles si son reducidos ($\leq 50\%$) para la impresión final. Todos los términos, abreviaturas y símbolos usados deben ser consistentes entre figuras, tablas y el texto. En el texto, se debe señalar el lugar aproximado donde se insertará cada figura.

Agradecimientos: En esta sección se debe hacer los reconocimientos que los autores creen necesarios a personas e instituciones. Asegúrese de escribir oraciones completas, por ejemplo: “agradecemos a José Pérez por sus sugerencias para mejorar el artículo”, “agradezco a Perico González por su asesoramiento en el manejo estadístico de los datos”, “Este trabajo fue parcialmente financiado por una beca de la ABC.” No es necesario utilizar títulos (Dr., M.Sc., Lic., etc.).

Referencias bibliográficas: El propósito de esta sección es dar el crédito a los autores de quienes se tomó ideas o datos. Antes de someter su manuscrito verifique que toda la literatura citada en el texto esté incluida en la lista de referencias y que ninguna referencia que no se haya citado en el texto haya sido incluida en la lista de referencias. Usar estilo APA sexta edición. Es recomendable generar la lista de referencias con ayuda del gestor de referencias usado para insertar las citas bibliográficas.



📍 Calle Sucre frente Parque la Torre

☎ 4543232 - 4232548 - 4231765

✉ iicyt@fcyt.umss.edu.bo

🌐 www.fcyt.umss.edu.bo

🏠 Facultad de Ciencias y Tecnología UMSS - Página Oficial