



Ciencias Naturales



Evaluación de la resistencia bacteriana ante antibióticos presentes en el río Mapocho durante la época de invierno

EVALUATION OF BACTERIAL RESISTANCE TO ANTIBIOTICS PRESENT IN THE MAPOCHO RIVER DURING THE WINTER SEASON

Estudiantes

María Paz Salazar Casas-Cordero
Luis Angel Ataulluco Vargas
Abel Andrés Eugenio Molina Astudillo
Rafaella Carolina Ríos Briones
Daniela Riveros Rojas
Millaray Andrea Norambuena Tum
Benjamín Ignacio Zepeda Vergara

Profesor guía

Juan Francisco Antonio Pinto Vargas

Asesor científico

Francisco Pablo Chávez Espinosa
Universidad de Chile

Colegio

Ozanam
Yungay 2845, Santiago

- Artículo Recibido: 3 de diciembre, 2021
- Artículo Aceptado: 31 de diciembre, 2021
- Artículo Publicado: 20 de agosto, 2022

El Proyecto participó en

- * Congreso Regional de innovación e investigación Explora RM Norte 2021
- * Expo Ciencias Nacional Chile 2021



Resumen

Los cuerpos de agua han sido uno de los objetos de estudio más frecuentes debido a la creciente intervención antrópica con desechos farmacéuticos, lo que se ha logrado observar en el último tiempo y que afecta gravemente a los ecosistemas involucrados. Para ello, se ha efectuado un estudio en el río Mapocho como sitio de muestreo, lugar donde previamente se ha comprobado la existencia de residuos farmacéuticos, entre ellos compuestos antimicrobianos. Es por esto que se puede inferir que en ciertos puntos con mayores niveles de contaminación podrían existir bacterias resistentes a antibióticos.

Mediante la caracterización y sectorización del cuerpo de agua en estudio, se realizó la toma de muestras, que posteriormente se sometieron a análisis de laboratorio para evaluar la resistencia bacteriana a compuestos antimicrobianos. Al concluir el proceso, los resultados indicaron la presencia de bacterias resistentes a antibióticos en el sector bajo del río, lo que podría estar relacionado con la contaminación por productos de origen farmacológico y ayuda a definir los factores negativos que influyen en la zona debido a la peligrosidad de este tipo de contaminación.

→ Palabras claves

Residuos farmacéuticos; Contaminación; Resistencia bacteriana; Río Mapocho.

Abstract

Water bodies have been among the most frequently studied subjects due to the increasing anthropogenic input of pharmaceutical waste, which has been observed in recent times and severely impacts the ecosystems involved. To address this, a study was conducted using the Mapocho River as a sampling site, a location where the presence of pharmaceutical residues, including antimicrobial compounds, has previously been confirmed. Therefore, it can be inferred that at specific points with higher contamination levels, antibiotic-resistant bacteria may be present.

Through the characterisation and zoning of the water body under study, sampling was carried out, and the collected samples were subsequently subjected to laboratory analysis to evaluate bacterial resistance to antimicrobial compounds. Upon completion of this process, the results indicated the presence of antibiotic-resistant bacteria in the lower sector of the river, which could be related to contamination from pharmaceutical products. This helps identify the negative factors influencing the area due to the hazardous nature of this type of pollution.

→ Keywords

Pharmaceutical residues; Contamination; Bacterial resistance; Mapocho River.

Introducción

En Chile, hay una gran diversidad de cuencas hidrográficas, las cuales han tenido que ser sometidas a estudios y análisis en varias ocasiones, sobre todo durante los últimos años. Este hecho, es la consecuencia de los altos niveles de contaminación que se han presentado, debido a la mayor intervención antrópica en cuerpos de agua. En la Región Metropolitana, donde existen más de siete millones de habitantes, es posible encontrar muchos casos de este tipo. Es por eso, que esta investigación basa su metodología en uno de los ríos con mayor valor patrimonial de la región, como lo es el río Mapocho.

El río Mapocho posee aproximadamente 110 kilómetros de extensión y una cuenca de 1.230 km². Baja desde una altura de 1.159 msnm, desembocando en el río Maipo a una altura de 252 msnm. Conecta 16 comunas pertenecientes a la región, desde el sector oriente al poniente, lo cual, le otorga una mayor biodiversidad y, por consiguiente, un ecosistema de considerable significancia para los habitantes, la cultura y el medioambiente, y que por supuesto, debe ser protegido (Katz et al., 2009).

Este río es un gran aportador de diversos servicios ecosistémicos, tales como el de cumplir su función como efecto enfriador, establecer rutas para transporte no motorizado y mitigar inundaciones (Vásquez, 2016). Sin embargo, desde hace más de un siglo, el río viene presentando complicaciones que perturban tanto sus servicios como su equilibrio ecológico. Algunos daños son reparables a corto o largo plazo, pero otros podrían llegar a ser irreversibles si es que no se

toman medidas al respecto. Algunas intervenciones que se pueden detectar son: el alcantarillado, los microbasurales creados en las cercanías y las construcciones de infraestructura que ocupan su cauce.

Los caudales urbanos no están considerados como fuentes de patógenos cuando no existen puntos contaminantes en este. Sin embargo, los caudales de zonas rurales, que son más propensos a poseer una mayor tasa de contaminación, son potenciales dispersores de contaminantes gracias a la escorrentía (Flores & Hernán, 2016). Además, en los últimos años, se ha visto un fuerte aumento de las intervenciones nombradas anteriormente, lo que da lugar a la posibilidad de que ríos, como el río Mapocho, se conviertan en dispersores de contaminación.

Generalmente, la contaminación farmacéutica en los cursos de agua está dada por mala gestión de residuos de dicho material, o por la llegada de desechos orgánicos con materia farmacéutica. Teniendo así en cuenta los distintos tipos de contaminación e intervención hacia cuerpos de agua de los cuales se tiene registro, hay uno que ha sido de gran interés científico últimamente y que ha estado afectando a ecosistemas a nivel mundial, se habla de la peligrosa contaminación por residuos farmacéuticos.

En un estudio realizado a nivel internacional (Wilkinson et al., 2022), en el que se obtuvieron muestras de 258 ríos de todo el mundo, siendo analizadas con 61 principios activos farmacéuticos (API), se estableció que

al menos en el 25,7% de los sitios de muestreo existen concentraciones superiores a las consideradas seguras para la biota acuática. Estas cifras no son ajenas al contexto chileno, ya que recientemente, se dio a conocer información sobre la contaminación farmacéutica en el río Mapocho, y a partir de esto, se genera un escenario alarmante, ya que se evidencia la presencia de antibióticos en el cauce del río.

La exposición medioambiental a los antibióticos es una problemática con daño a largo plazo, tanto para la salud humana como para el bienestar del ecosistema. Es así, como este tipo de contaminación, genera lentamente, un aumento de la resistencia bacteriana a antibióticos, lo cual, en un futuro no muy lejano, traerá consecuencias mayores para las metodologías médicas en el ámbito farmacéutico (Frieri et al., 2017).

Pregunta de Investigación

¿Es posible observar diferencias en el perfil de resistencia a antibióticos de las comunidades bacterianas en distintas secciones del río Mapocho en el invierno del 2022?

Hipótesis

Basándonos en los puntos de muestreo y en sus diferentes características espaciales, existe un cambio en la resistencia a antibióticos en las comunidades bacterianas.

Objetivo general

Evaluar la resistencia de las comunidades bacterianas presentes en distintas secciones del Río Mapocho.

Objetivos específicos

- Designar puntos de muestreo según su caracterización espacial.
- Analizar las comunidades bacterianas presentes en las muestras.
- Exponer las comunidades bacterianas a antibióticos.
- Interpretar una relación entre los puntos geográficos y la resistencia a antibióticos de las comunidades.

Metodología

La investigación se llevó a cabo en Santiago, Región Metropolitana de Chile, Río Mapocho, clima mediterráneo con estaciones bien marcadas.

A. Revisión bibliográfica:

Para entender cómo los desechos farmacéuticos vertidos en el río Mapocho podrían afectar la resistencia a antibióticos de las comunidades de bacterias, se realizó una revisión bibliográfica sobre ¿Cómo estas comunidades logran adquirir dicha resistencia?, ¿De qué forma esto presenta una problemática a nivel salud?

Motores de búsqueda

- Google Académico
- Scielo

Palabras clave

- Contaminación río Mapocho
- Contaminación farmacéutica + río Mapocho
- Río Mapocho + desechos farmacéuticos
- Resistencia a antibióticos
- Resistencia a antibióticos + desechos farmacéuticos

B. Tomas de muestras

En la selección de los puntos de muestreo, con el fin de tener muestras más representativas de las comunidades bacterianas presentes en el río Mapocho, se eligieron diferentes tramos de éste. Una muestra río arriba (M3), en las aproximaciones del sector urbano central, una en un punto medio del río, en pleno territorio céntrico (M1) y otra río abajo, hacia una zona más periférica (M2).

- Punto 1 (M1): 33°25'38.13"S 70°40'12.20"W
- Punto 2 (M2): 33°29'57.97"S 70°49'13.69"W
- Punto 3 (M3): 33°22'32.78"S 70°31'53.65"W

Esto se puede observar en la imagen 1.

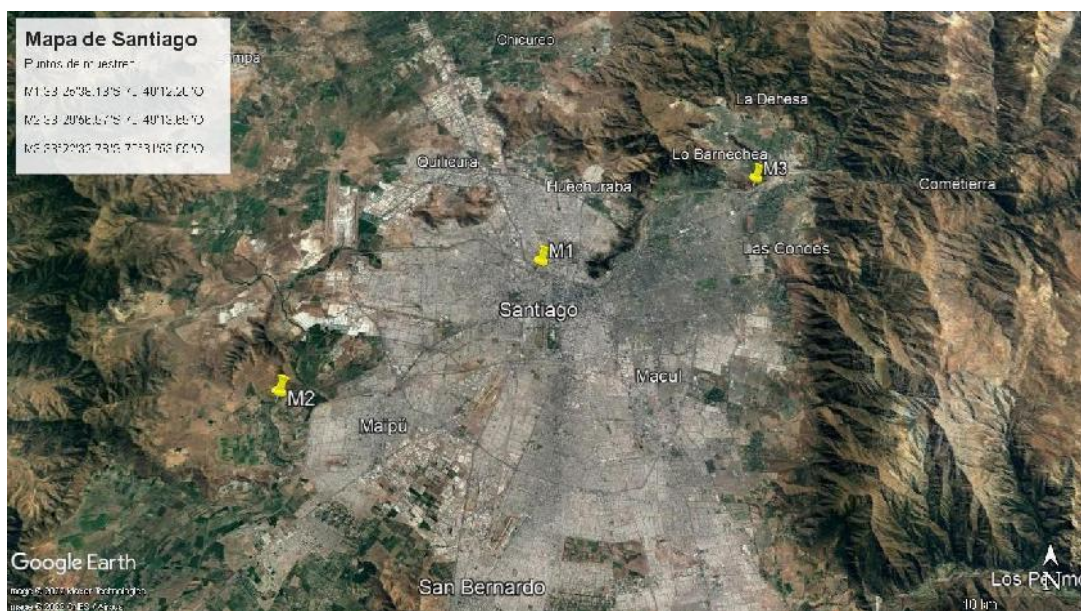


Figura N° 1. Mapa de Santiago en el cual se destacan los puntos de muestreo definidos para la investigación)

Para la toma de muestras se utilizaron los siguientes implementos:

Tubos Falcon

- Guantes de latex
- Cooler
- Ice Stop-Pack
- Vehículo
- GPS
- Software Google Earth

C. Análisis de datos

Se asistió al laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, con el objetivo de cultivar las comunidades bacterianas presentes en las muestras y analizar su resistencia a antibióticos.

Por cada muestra se cultivaron en las siguientes condiciones que aparecen en la tabla 1.

Antibióticos	Concentraciones	M1	M2	M3	Dilución
LB	100 μ L	100 μ L	100 μ L	100 μ L	-4
	100 μ L	100 μ L	100 μ L	100 μ L	-5
	100 μ L	100 μ L	100 μ L	100 μ L	-6
	100 μ L	100 μ L	100 μ L	100 μ L	Directa
Colistina (5 μ L/ml)	25 μ L	25 μ L	25 μ L	25 μ L	
	100 μ L	100 μ L	100 μ L	100 μ L	
	100 μ L	100 μ L	100 μ L	100 μ L	
	200 μ L	200 μ L	200 μ L	200 μ L	
Ampicilina (100 μ L/ml)	25 μ L	25 μ L	25 μ L	25 μ L	
	100 μ L	100 μ L	100 μ L	100 μ L	
CHROMagar	25 μ L	25 μ L	25 μ L	25 μ L	
	100 μ L	100 μ L	100 μ L	100 μ L	

En un segundo análisis, se seleccionaron las placas con mayor cantidad de colonias en presencia de antibióticos.

Se realizaron rayados en dos nuevas placas. Se colocaron 8 colonias de las previamente seleccionadas de las placas mencionadas, las cuales fueron expuestas nuevamente a los antibióticos Colistina y Ampicilina.

Posterior a eso, se efectuó una prueba de caracterización, en la que se sometieron 3 de las 8 colonias bacterianas a un Agar MacConkey.

Para el procedimiento experimental se ocuparon los siguientes implementos:

Implementos de laboratorio

- 5 mecheros
- 47 placas de cultivo
- 6 rastrillos bacteriológicos
- Agar agar
- Agar Macconkey
- Horno de cultivo
- 6 placas con Ampicilina a una concentración de 5 uL/mL
- 12 placas con Colistina a una concentración de 100 uL/mL

Resultados y Discusión

En el primer cultivo de bacterias, se pudo observar el crecimiento de colonias en los medios LB y Colistina, únicamente en las placas correspondientes a la muestra M2.

Medios	Concentraciones	M1	M2	M3		Dilución
LB						
N°1	100uL	NO	NO	NO		-4
N°2	100uL	NO	NO	NO		-5
N°3	100uL	NO	NO	NO		-6
N°4	100uL	NO	SI	NO		Directa
COLISTINA						
N°1	25uL	NO	NO	NO		
N°2	100uL	NO	SI	NO		
N°3	100uL	NO	SI	NO		
N°4	200uL	NO	SI	NO		
AMPICILINA						
N°1	25uL	NO	NO	NO		
N°2	100uL	NO	NO	NO		
CHROMAGAR						
N°1	25uL	NO	SI	NO		
N°2	100uL	NO	SI	NO		

Tabla 2. Se indica individualmente si existió crecimiento en las placas del primer cultivo de bacterias

En la tabla 3 se muestran los resultados del cultivo de las colonias extraídas de la placa Petri con el medio LB con Colistina que se observa en el anexo 18. Se puede determinar el crecimiento de cada colonia con su respectivo medio sólido selectivo, donde sólo en el medio Ampicilina se presenta un crecimiento en las colonias 1, 2, 3, y 4 a diferencia de los otros medios, donde sí crecieron las colonias en su totalidad como se pueden observar en las imágenes 2 3, 4.y 5.



Imagen 2 crecimiento en medio LB. Cultivo de las 8 colonias extraídas de la placa N°3 del medio LB con Colistina



Imagen 3 placas con Colistina. Cultivo de las 8 colonias extraídas de la placa N°3 del medio LB con Colistina



Imagen 4 placas con chromagar. Cultivo de las 8 colonias extraídas de la placa N°3 del medio LB con Colistina

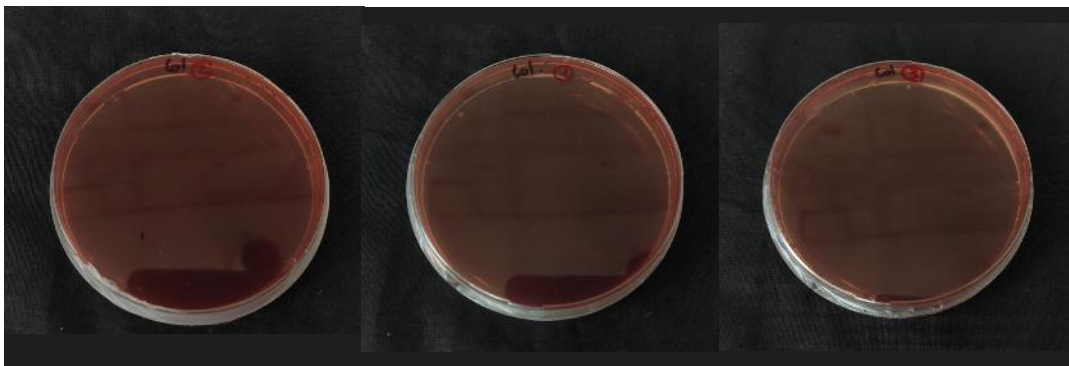


Imagen 5 placas con Ampicilina. Cultivo de las 8 colonias extraídas de la placa N°3 del medio LB con Colistina

En los cultivos del medio Agar MacConkey con Colistina, al ser un medio selectivo de bacterias gram-, no se pudo apreciar crecimiento de colonias, como se observa en la imagen 6.

Medios	Colonia 1	Colonia 2	Colonia 3	Colonia 4	Colonia 5	Colonia 6	Colonia 7	Colonia 8
Muestra LB	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
COLISTINA	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
CHROMAGAR	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
AMPICILINA	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO

Tabla 3. Se indica individualmente si existió crecimiento en las placas del segundo cultivo de bacterias correspondiente a las 8 colonias extraídas de la placa N°3 del medio LB con Colistina



Imágenes 6 de cultivos en Agar MacConkey, colonias 1,2 y 3

Análisis y Discusión

Los antibióticos son medicamentos utilizados para prevenir y tratar las infecciones bacterianas. La resistencia a los antibióticos se produce cuando las bacterias mutan en respuesta al uso de estos fármacos, como también puede estar de manera natural en la bacteria o incluso, ser transferida entre estos microorganismos (OMS, 2020). En Chile, el uso de medicamentos es de alta demanda, según la encuesta nacional de medicamentos del año 2017, arrojó que un 58% de los/as chilenos/as consume al menos un medicamento al día (Minsal et al., 2017). Es por estos factores, que los medicamentos usados en este estudio se seleccionaron en consideración de que son bastante utilizados en la medicina chilena, sin embargo queda una incógnita en si realmente existen altas concentraciones de estos antibióticos en el río Mapocho, lo cual se planea averiguar en las proyecciones de esta investigación.

Según lo que se observa en la tabla 2 en las muestras M2 fueron las únicas en donde se obtuvo proliferación bacteriana, Según lo anterior, se puede interpretar que los resultados obtenidos para M2 se deben al lugar en el cual esa muestra fue tomada, ya que en ese punto el río Mapocho intercepta con el zanjón de la Aguada, correspondiendo así a un canal con alta densidad de materia orgánica particulada en suspensión (Medina, 2017), otorgando un medio propicio tanto para el crecimiento como presencia de comunidades bacterianas. Por ello en futuras investigaciones se buscará crear un plan actualizado de los puntos de muestreo en donde se intensifique el muestreo en dicha zona y determinar las causantes de esta resistencia bacteriana ante antibióticos hallada en este estudio.

Con respecto al medio con ampicilina, no hubo crecimiento bacteriano para M2, tal cual como se aprecia en la tabla 2 y en los anexos 14-15. Por lo anterior, es

que se realizó un segundo cultivo para ampicilina con muestras extraídas de las bacterias que proliferaron en el medio de colistina. Como se aprecia en la tabla 3, hubo un crecimiento de bacterias en el medio con ampicilina (imagen 5). La ampicilina es un antibiótico de amplio espectro del grupo betalactámicos, lo que quiere decir que actúa tanto en bacterias gram positivas como en bacterias gram negativas. Su mecanismo de acción radica en inhibir la última etapa de la síntesis de la pared celular bacteriana uniéndose a unas proteínas específicas llamadas PBPs (Penicillin-Binding Proteins) localizadas en la pared celular. Al impedir que la pared celular se construya correctamente, la ampicilina ocasiona en último término, la lisis de la bacteria y su muerte (ANMAT, 2010). Al observar crecimiento bacteriano en este medio, podemos interpretar a grandes rasgos, que existen bacterias resistentes a este antibiótico y que podrían también serlo para todo el grupo, pero esto último se agrega a las proyecciones para continuar con el proyecto investigativo (betalactámicos).

En cuanto al crecimiento de bacterias en el medio de colistina, se realizó un cultivo en agar MacConkey, el cual se caracteriza por ser un medio selectivo y diferencial que se utiliza para el aislamiento y la diferenciación de bacilos gramnegativos. No se obtuvo crecimiento bacteriano en esta prueba, por lo cual, podemos inferir que las bacterias que se encontraron corresponden a gram positivas, y la colistina, que es un antibiótico del grupo de las polimixinas (fármacos utilizados para eliminar bacterias gram negativas multirresistentes) (Medina, J. 2017), demostró tener una gran efectividad en el contexto dado. Por lo cual, al no atacar bacterias gram positivas, era de esperar que se obtuviera un crecimiento de estas en un cultivo con presencia de colistina, como se aprecia en la tabla 3 y en la imagen 6.

Conclusión

En base a los datos obtenidos, en el río Mapocho sí existen bacterias resistentes a antibióticos, precisamente a Ampicilina y Colistina. Esto no significa que todas las bacterias han obtenido resistencia, sin embargo, al no tomar medidas para detener este proceso, se puede decir que la resistencia a antibióticos es un peligro inminente para las comunidades que habitan en las cercanías del río.

Los resultados del estudio permiten determinar que las bacterias presentes en las muestras expuestas a antibióticos se caracterizan como bacterias gram positivas.

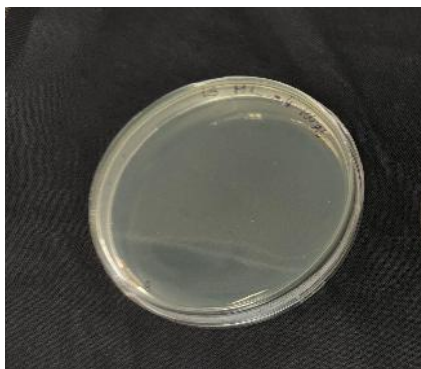
Además, de acuerdo con la sectorización del cauce establecida inicialmente, se puede confirmar la relación entre la resistencia bacteriana y el punto geográfico de la respectiva muestra.

Con esto, también se puede determinar una reflexión sobre la automedicación y la negligencia médica, ya que como se mencionó inicialmente, gran parte de los fármacos depositados en el río Mapocho o en diversos cuerpos de agua, llegan a través de desechos orgánicos como heces y orinas de los consumidores de medicamentos. Entonces, con un mayor consumo de antibióticos se está alentando a la resistencia bacteriana ante los antibióticos, lo cual a su vez, es un peligro para la salud pública, puesto a que los medicamentos como los antibióticos son los grandes mecanismos de defensa ante enfermedades. Aparte, es necesario pensar en el ecosistema que se ve perjudicado por la llegada de agentes externos como los fármacos.

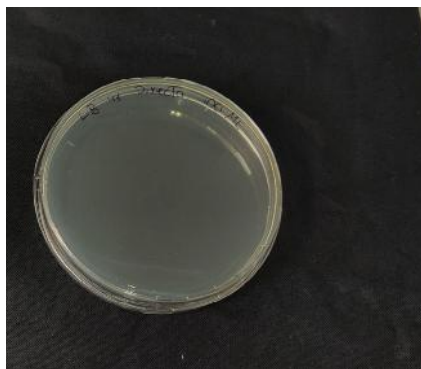
Con esto y futuras investigaciones respecto al tema, se quiere proponer a la sociedad buscar soluciones ciudadanas que solucionen estos problemas que se tienen en la actualidad y que si no se toma ninguna acción al respecto las consecuencias serán más grandes y preocupantes en un futuro.

- ANMAT. (2010). Ampicilina. VADEMECUM <https://iqb.es/cbasicas/farma/farma04/a052.htm>
- Aryal, S., (2022). MacConkey Agar- Composition, Principle, Uses, Preparation and Colony Morphology. Microbiology Info.com. <https://microbiologyinfo.com/macconkey-agar-composition-principle-uses-preparation-and-colony-morphology/>
- Flores, V., & Hernán, J. (2016). Resistencia a los antibióticos en cepas de Salmonella spp. aisladas desde cauces de agua de la Región Metropolitana y su asociación con el área geográfica. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140686>
- Frieri, M., Kumar, K., & Boutin, A. (2017). Antibiotic resistance. Journal of Infection and Public Health, 10(4), 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2016.08.007>
- OMS. (2020). Resistencia a los antibióticos. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/resistencia-a-los-antibi%C3%B3ticos>
- Katz, C., Reid, P., & Andrade, M. (2009). Tres visiones sobre el río Mapocho. ARQ (Santiago. Impresa), 72, 56–59. <https://doi.org/10.4067/s0717-69962009000200011>
- Medina, J. (2017). Actualización acerca de colistina (polimixina E): aspectos clínicos, PK/PD y equivalencias. Revista Médica del Uruguay. Rev. Méd. Urug. vol.33 no.3 Montevideo set. 2017
- Minsal. (2017). INFORME ENCUESTA NACIONAL DE SALUD 2016-2017; Uso de medicamentos.
- Vásquez, A. E. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. Revista de Geografía Norte Grande, 63, 63–86. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000100005>
- Wilkinson, J. L., Boxall, A. B. A., Kolpin, D. W., Leung, K. M. Y., Lai, R. W. S., Galbán-Malagón, C., Adell, A. D., Mondon, J., Metian, M., Marchant, R. A., Bouzas-Monroy, A., Cuni-Sanchez, A., Coors, A., Carriquiriborde, P., Rojo, M., Gordon, C., Cara, M., Moermond, M., Luarte, T., ... Teta, C. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 119(8), e2113947119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2113947119>

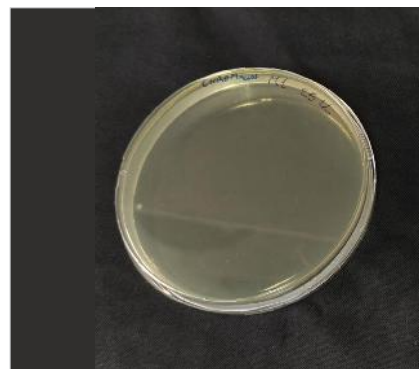
Anexos



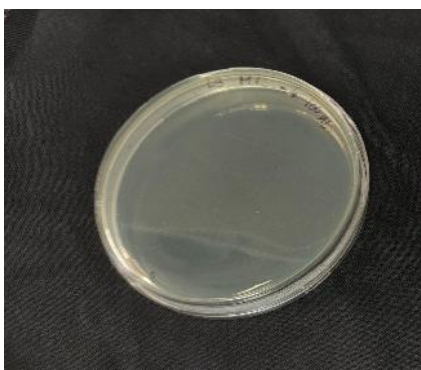
Anexo 1. Muestra de M1 con dilución 10^{-4} en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 4. Muestra de M1 directa en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 7. Muestra de M1 directa en placa con medio de cultivo Chromagar (25 mL)



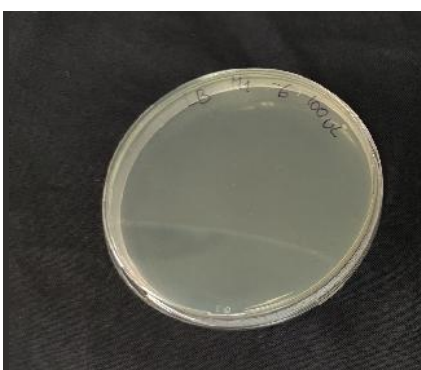
Anexo 2. Muestra de M1 con dilución 10^{-5} en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 5. Muestra de M1 directa en placa con medio de cultivo LB+Ampicilina (25 mL)



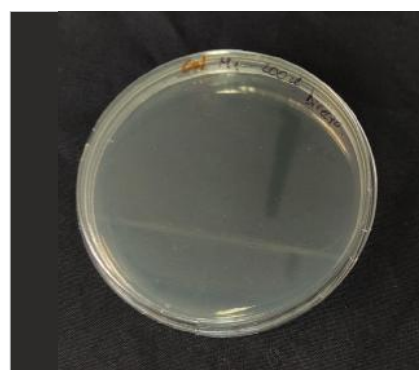
Anexo 8. Muestra de M1 directa en placa con medio de cultivo Chromagar (100 mL)



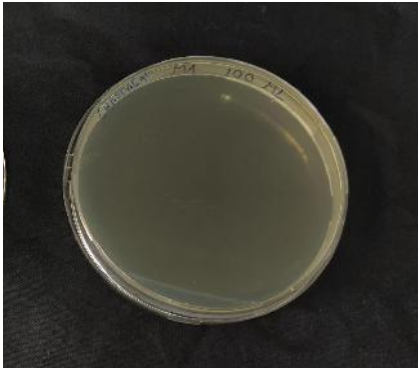
Anexo 3. Muestra de M1 con dilución 10^{-6} en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 6. Muestra de M1 directa en placa con medio de cultivo LB+Ampicilina (100 mL)



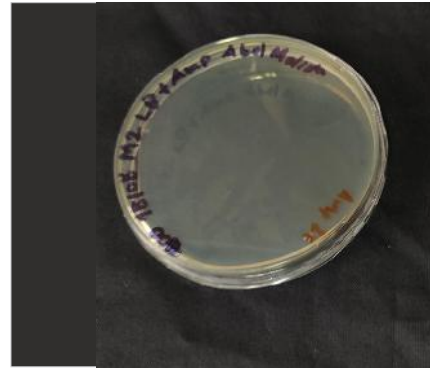
Anexo 9. Muestra de M1 directa en placa con medio de cultivo LB+Colistina (200 mL)



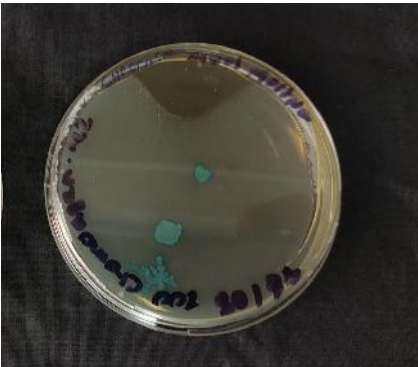
Anexo 10. Muestra de M1 directa en placa con medio de cultivo Chromagar (100 mL)



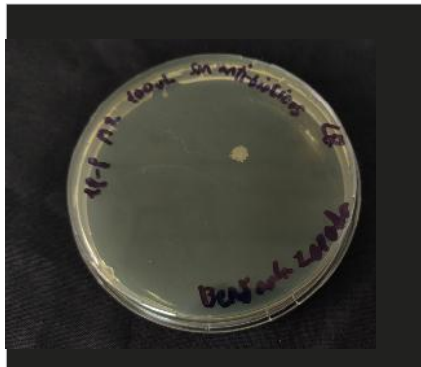
Anexo 13. Muestra de M2 con dilución 10^{-6} en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 16. Muestra de M2 directa en placa con medio de cultivo LB+Ampicilina (100 mL)



Anexo 11. Muestra de M2 directa en placa con medio de cultivo Chromagar (100 mL)



Anexo 14. Muestra de M2 directa en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 17. Muestra de M2 directa en placa con medio de cultivo LB+Ampicilina (25 mL)



Anexo 12. Muestra de M2 con dilución 10^{-5} en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 15. Muestra de M2 con dilución 10^{-4} en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 18. Muestra de M2 directa en placa con medio de cultivo LB+Colistina (200 mL)



Anexo 19. Muestra de M2 directa en placa con medio de cultivo LB+Colistina (100 mL)



Anexo 22. Muestra de M3 con dilución 10^{-6} en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



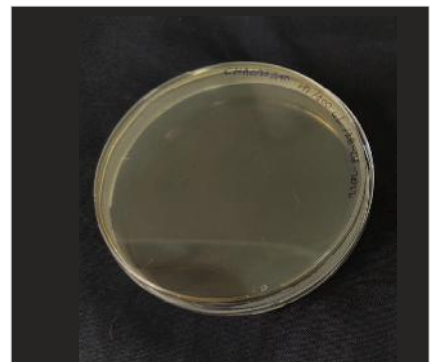
Anexo 25. Muestra de M3 directa en placa con medio de cultivo LB+Ampicilina (100 mL)



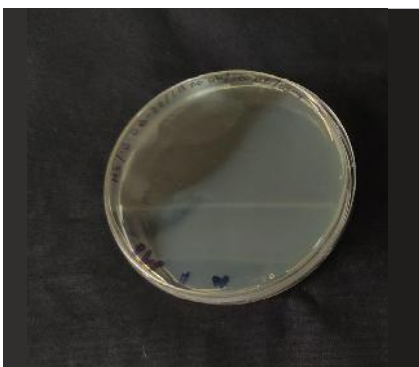
Anexo 20. Muestra de M2 directa en placa con medio de cultivo LB+Colistina (25 mL)



Anexo 23. Muestra de M3 directa en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



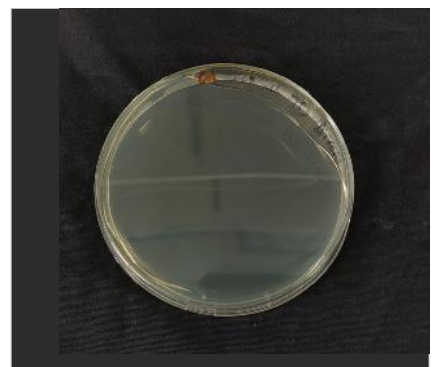
Anexo 26. Muestra de M3 directa en placa con medio de cultivo Chromagar (100 mL)



Anexo 21. Muestra de M3 con dilución 10^{-4} en placa con medio de cultivo LB (100 mL)



Anexo 24. Muestra de M3 directa en placa con medio de cultivo LB+Ampicilina (25 mL)



Anexo 27. Muestra de M3 directa en placa con medio de cultivo LB+Colistina (100 mL)

Técnicas de Percepción Remota Cualitativa y Cuantitativa para Identificar Microalgas y sus Principales Causas de Crecimiento en las Islas Shetland del Sur

*QUALITATIVE AND QUANTITATIVE REMOTE SENSING
TECHNIQUES TO IDENTIFY MICROALGAE AND THEIR
MAIN CAUSES OF GROWTH IN THE SOUTH
SHETLAND ISLANDS*

 **Estudiantes**

Diego Illanes Gazmuri, III^oC
José Quijarro Ampuero, III^oC

Profesor guía

Rodrigo Azócar Donoso
Colegio Capellán
Pascal, Viña del mar, V Región

- Artículo Recibido: 3 de diciembre, 2021
- Artículo Aceptado: 31 de diciembre, 2021
- Artículo Publicado: 20 de agosto, 2022

El Proyecto participó en

- * XIX FERIA ANTÁRTICA ESCOLAR 2022
- * Ganador mejor puntuación jurado ciudadano



Resumen

En este trabajo presentamos las estimaciones de vegetación presentes en las Islas Shetland del Sur a partir de teledetección. Utilizando la combinación de bandas proporcionadas por el satélite Sentinel-2, formulamos un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que es un indicador numérico altamente asociado al contenido de vegetación. Sus valores más altos corresponden a zonas que reflejan más el espectro del infrarrojo cercano, ya que una mayor reflectancia en esta banda indica mayor cobertura vegetal.

La biomasa de algas en la nieve provoca una reducción del albedo en comparación con la nieve limpia. Las manchas verdes visibles reducen el albedo de la nieve en aproximadamente un 40 %, mientras que las manchas rojas lo disminuyen en un 20 %, dado que los pigmentos de las algas no solo actúan como protectores, sino que también desempeñan un papel funcional en la fusión de la nieve y el hielo (Khan et al., 2021).

Con base en estos resultados de teledetección, pretendemos identificar aquellos lugares con mayor NDVI para analizar las principales causas del crecimiento y la floración de microalgas.

→ Palabras claves

Teledetección, NDVI, Islas Shetland del Sur, Microalgas, Albedo, Biomasa de algas, Sentinel-2.

Abstract

In this study, we present vegetation estimates for the South Shetland Islands based on remote sensing. Using the combination of bands provided by the Sentinel-2 satellite, we calculated a Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), which is a numerical indicator strongly associated with vegetation content. Higher NDVI values correspond to areas that reflect more in the near-infrared spectrum, as greater reflectance in this band indicates higher vegetation cover.

Algal biomass on snow results in a reduction in albedo compared to clean snow. Visible green patches reduce snow albedo by approximately 40 %. In comparison, red patches reduce it by 20 %, since algal pigments not only act as protective compounds but also play a functional role in snow and ice melt (Khan et al., 2021).

Based on these remote sensing results, we aim to identify areas with higher NDVI values to analyse the main drivers of microalgae growth and bloom.

→ Keywords

Remote sensing, NDVI, South Shetland Islands, Microalgae, Albedo, Algal biomass.

Introducción

El aumento en la temperatura atmosférica y del Océano Antártico ha generado el retroceso de los glaciares en la Península Antártica, lo que ha provocado un incremento en la tasa de deshielo y junto a ello, el desmembramiento de los glaciares (Jeremy., 2021). En la región de las islas Shetland del Sur comenzamos a visibilizar un aumento en la floración de diferentes tipos de algas de nieve (Ganey et al., 2017; Lutz et al., 2016; Khan et al., 2021), las que producen en la nieve, hielos y glaciares una reducción de albedo general de la isla. El albedo es definido como la medida de la cantidad de radiación saliente de onda larga, reflejada del total de la radiación solar de onda corta entrante en una superficie (Steinmetz., 2018), es decir, el albedo es la proporción de radiación reflejada en la superficie por diferentes cuerpos. La nieve fresca y limpia tiene un albedo muy alto, de 0.8-0.9 (en escala de 0 a 1), en consecuencia, un albedo más bajo significa que se absorbe más radiación solar. Esta energía absorbida, calienta la nieve/hielo y conduce a un mayor derretimiento.

Por lo tanto, se produce un aumento de microalgas en la superficie. En recientes estudios se ha mencionado el “bioalbedo” como el impacto directo del material biológico en el albedo de la nieve y el hielo, siguiendo una abreviatura del término “albedo biológico” presentada por Kohshima et al. (1993).

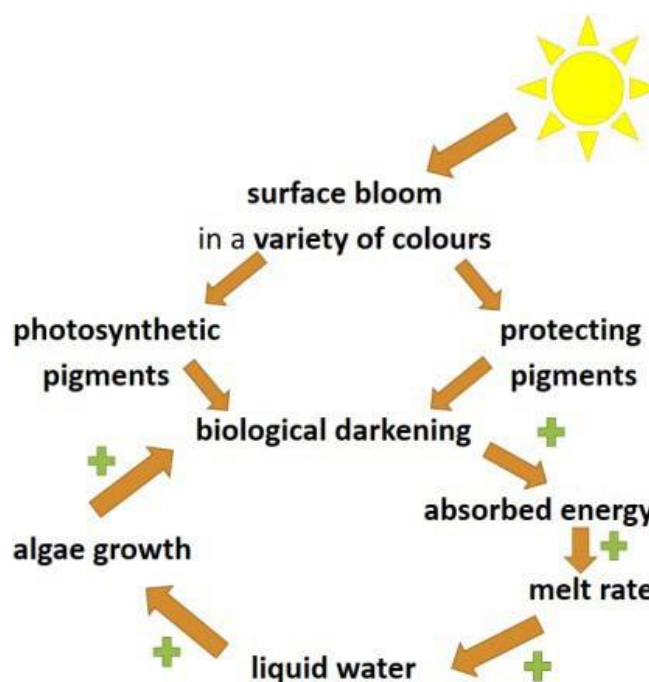


Figura 1 | Esquema del ciclo vital del bioalbedo de las algas, que ilustra el proceso de crecimiento proporcional de las algas con respecto al derretimiento de la nieve. Fuente | Steinmetz., 2018

El bioalbedo es un componente importante del balance energético de los glaciares y las capas de hielo. Este corresponde al impacto de impurezas biológicas en el albedo de la nieve y el hielo, además de que conduce a la reducción del albedo por medio de diferentes efectos de variables biológicas como la biomasa, la pigmentación y el tamaño de las células en el albedo de la superficie. Estudios anteriores han podido confirmar que las impurezas biológicas son componentes potencialmente significativos del albedo de la superficie, y se descubrió que las propiedades ópticas de las células son determinantes de la magnitud de su efecto de reducción del albedo (Cook et al., 2017).

Las algas de la nieve son favorecidas por las zonas de descongelación, ya que el deshielo proporciona entornos adecuados para el crecimiento, absorben la luz reduciendo así el albedo y agravando a su vez el deshielo.

El color que las algas le dan a la nieve está asociado a los pigmentos dominantes relacionados con la fase del ciclo vital. En relación con la nieve limpia, las manchas verdes de las algas visibles reducen el albedo de la nieve en un 40% y las manchas rojas en un 20% (Khan et al., 2021). Los diferentes pigmentos que producen las algas de nieve tienen un rol funcional en el derretimiento de la nieve y hielo, ya que facilitan tanto la capacitación del luz en el espectro visible como la disipación de energía en condiciones de irradiación excesiva (Cook et al., 2017; Remias et al., 2009; Remias et al., 2012; Yallop et al., 2012) además de que poseen grandes características de absorción, se descubrió que este tipo de pigmentos oscurecen los pigmentos primarios de capacitación de luz y de protección, y disminuye el albedo de la superficie de la capa de hielo. De toda la energía radiante que nos llega procedente del sol, aproximadamente el 30% es reflejado al espacio por el albedo, el 50% es absorbido en la superficie y el 20% restante es absorbido por la atmósfera (Santamaría J., 2010).

Las algas nivreas además de acelerar el deshielo a través de perturbaciones en el albedo de la nieve, logran el derretimiento mediante su Forzamiento Radiativo (RF) asociado. Este alude a la forma de cuantificar un desequilibrio energético impuesto al sistema climático. La mayor absorción de la irradiación solar se debe principalmente al oscurecimiento de la cobertura de nieve. Cuando las algas se encuentran en la superficie de la nieve o cerca de ella, estas reducen inmediatamente el albedo en las longitudes de onda visibles en las que la nieve es más reflectante, como se puede observar en la Fig.2. La disminución del albedo se ve agravada por un proceso conocido como retroalimentación del

tamaño del grano. Esta se describe como el calentamiento relacionado con las Partículas que Absorben Luz (LAP) las que aceleran el crecimiento de los granos de nieve disminuyendo aún más la reflectividad. Las LAPs comúnmente se componen de polvo, carbón negro, pero también de algas de nieve, y ahí se encuentra la relación que existe entre estas 2 (Skiles et al., 2018).

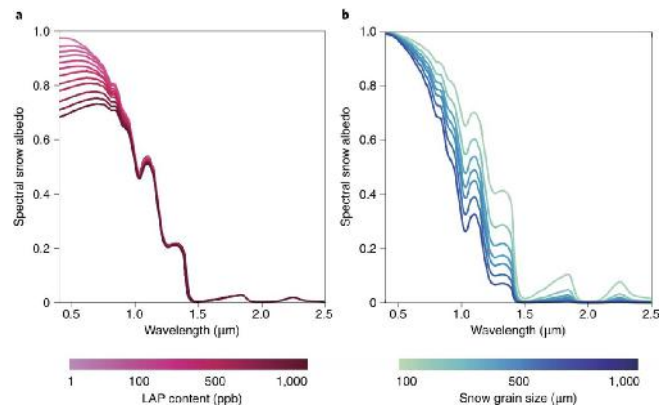


Figura 2 | Variación del albedo en la nieve en rango de reflectancia (expresadas en micrómetros (μm)) de la nieve con respecto al contenido de LAP y el tamaño del grano de la nieve. En a. el Albedo de la nieve, que muestra la disminución del albedo visible a medida que aumenta el contenido de Partículas que Absorben Luz (LAP) por partes por billón (ppb). En tanto que en b. el albedo de la nieve limpia, que muestra la disminución del albedo de la nieve en las longitudes de onda más largas a medida que aumenta el tamaño del grano de la nieve.

Fuente | Skiles et al., 2018

En conjunto, ésta RF directa (oscurecimiento) e indirecta (engrosamiento de los granos) relacionada con LAP, descubre antes la cobertura de nieve más oscura, aumentando la energía disponible para el deshielo (Skiles et al., 2018). Los distintos tipos de coberturas terrestres se distinguen por la energía que absorben, reflejan y emiten respecto de un emisor de energía electromagnética (en nuestro caso el Sol). Este comportamiento a diferentes longitudes de onda se conoce como firma espectral (Alonso et al., 1999). Cada objeto sobre la superficie terrestre tiene diferentes interacciones con la luz (energía electromagnética) debido a sus composiciones físicas y bioquímicas, por lo que cada cuerpo tendrá su propia firma espectral y podrán diferenciarse en cuanto su interacción con la luz sea diferente. En la Fig. 3 podemos observar que incluso las diferentes propiedades físicas de la nieve (grano fino, medio o grueso) producen algunas variaciones en sus firmas. En tanto que en la Fig. 4 podemos ver que diferentes cuerpos tienen diferentes propiedades de reflectancia, como el agua que absorbe la totalidad de la energía en las regiones del Infrarrojo cercano (NIR) en adelante.

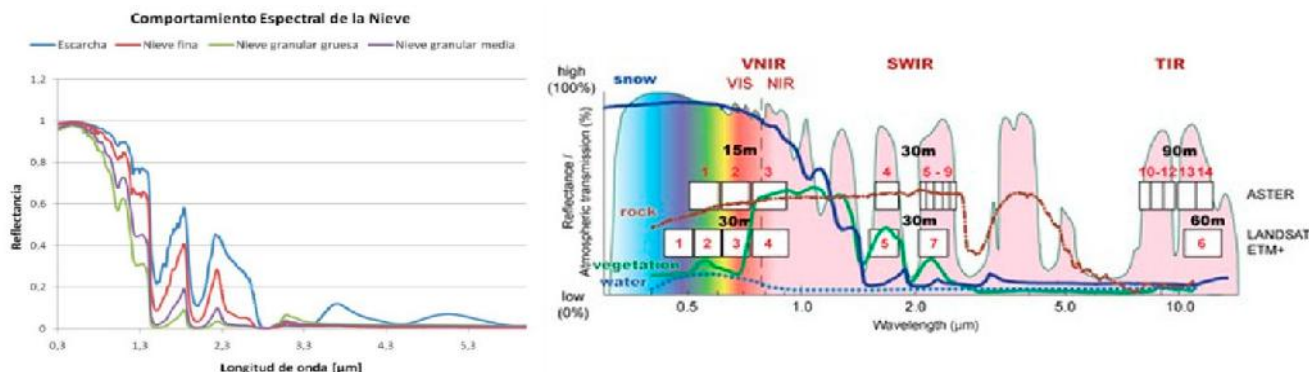


Figura 3 | Firma espectral de distintas coberturas de nieve. En eje x diferentes regiones del espectro magnético, y en eje y porcentaje de reflectancia (cantidad de energía devuelta).
Fuente | Cruz., 2020 como se citó en Hernández, 2007.

El objetivo de esta investigación es poder determinar a través de imágenes satelitales Sentinel-2, cómo la disminución de la nieve (debido a múltiples factores) ha producido el aumento de aparición de algas en la superficie. Las algas de nieve influyen en el albedo espectral de la nieve en el espectro visible, 400-700 nm (Warren y Wiscombe, 1980 como se citó en Khan A., et al 2021). El albedo espectral depende además de las propiedades físicas de la nieve, como dicho anteriormente el tamaño y la forma de este, el contenido de agua líquida, la rugosidad de la superficie, la profundidad de la nieve, el albedo del suelo subyacente (en el caso de paquetes de nieve finos) y la densidad de la nieve (Flanner et al., 2007 como se citó en Khan A., et al 2021).

Nuestra área de estudio son las islas Shetland del Sur (Fig. 5) las cuales son un conjunto de islas que están en la parte norte de la península antártica, por lo que están mayormente influenciadas por los cambios atmosféricos.

Debido a la naturaleza remota e inaccesible de las costas de la península antártica, hacen que poder extraer muestras del terreno antártico o utilizar métodos de prospección en la nieve se dificulte. Por lo tanto, los métodos de teledetección por satélite que brindan imágenes de la cobertura regional son el único medio práctico para analizar la distribución de microalgas. La teledetección consiste en observar la reflectancia de las distintas ondas de luz que producen ciertos objetos en la superficie de la tierra. Los distintos tipos de satélites artificiales que existen y que orbitan alrededor de la tierra, se caracterizan por tener funciones específicas que varían según su tipo, éstos pueden ser con fines astronómicos, de navegación o de comunicaciones entre otros tipos, pero aquellos que sirven para analizar los cambios que sufre la tierra, son los satélites meteorológicos, estos nos sirven para observar constantemente el clima, además de poder dar detalles de la atmósfera y de la cartografía del planeta. Entre estos tipos de satélite, sobresalen dos, la serie norteamericana Landsat y el europeo Sentinel-2, los cuales pertenecen a la NASA y ESA respectivamente.

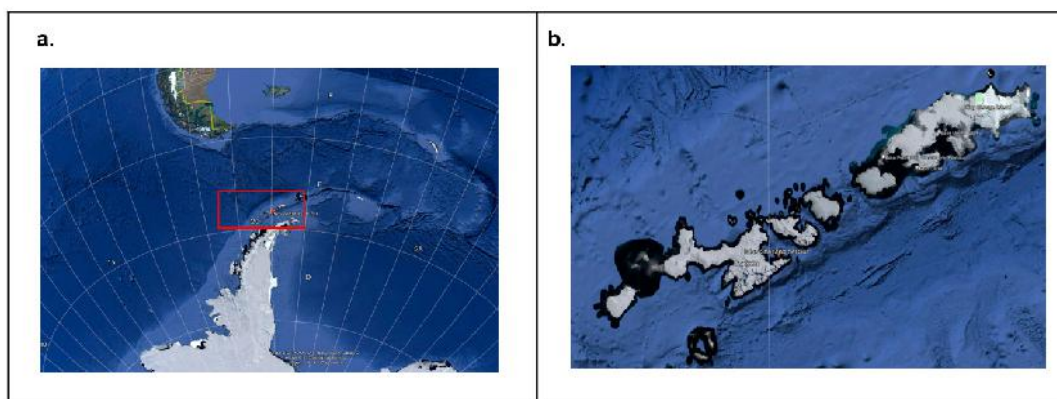


Figura 5 | Mapa de localización de Google Earth Pro. En a. la Antártica y parte del Sur de Chile con cuadro rojo del área de las Islas Shetland del Sur. En tanto que en b. un zoom a nuestra área de interés (cuadro rojo en a).

Para esta investigación, los satélites meteorológicos son de mayor utilidad ya que nos permiten analizar diferentes imágenes satelitales de varios lugares en toda la tierra, incluyendo el casquete polar y el continente antártico. Los datos de Sentinel-2 nos permiten observar con un detalle (resolución espacial) de 10x10 metros (en espectro visible e infrarrojo cercano) desde el año 2015 en adelante. A diferencia de las imágenes Landsat que, si bien hay disponibilidad desde el año 1986 en su catálogo mundial, el nivel de detalle es menor (30x30 metros).

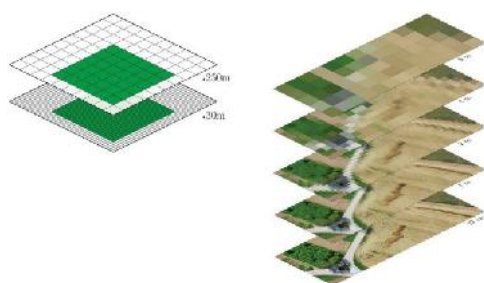


Figura 6 | Comparación entre distintos niveles de detalle espacial (resolución espacial o tamaño del píxel) sobre una misma área. Imagen de Martin Wegman (2016) en Remote Sensing and GIS for Ecologist.

El satélite Sentinel-2 posee trece bandas (Tabla 1) que van desde la luz visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), estas pueden captar los tipos de luz que reflejan distintos objetos. Estas bandas varían en una resolución que va desde los 10m hasta los 60m, y según lo que se vaya necesitando en las imágenes, es aquella banda que se va a ir ocupando.

Pregunta de investigación o problema que desean resolver

¿Cómo influye el efecto bioalbedo en el aumento de microalgas en los últimos años en las Islas Shetland del Sur?

Hipótesis de trabajo

El aumento de las temperaturas y derretimiento de nieve ha desencadenado en mejorar las condiciones para el desarrollo de las algas en tierra y nieve, por lo que la cobertura de estas aumentaría con el tiempo, aumentando así el bioalbedo en la superficie antártica.

Objetivo general

Analizar imágenes Sentinel-2 de manera cualitativa y cuantitativa para determinar si la superficie de algas ha aumentado en el tiempo en las Islas Shetland del Sur.

Objetivos específicos

- Obtener imágenes satelitales de Sentinel-2 desde el portal de la USGSS (EarthExplorer).
- Calcular el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) para la detección de algas en superficie.
- Comparar la cantidad de píxeles de imágenes satelitales de distintos años de la isla Rey Jorge.
- Contribuir con datos duros a la demostración del cambio climático y la importancia de mantener estables los ecosistemas antárticos

N°	Bandas	Ancho de banda (µm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol	0.43 – 0.45	60
2	Blue	0.45 – 0.52	10
3	Green	0.54 – 0.57	10
4	Red	0.65 – 0.68	10
5	Red edge 1	0.69 – 0.71	20
6	Red edge 2	0.73 – 0.74	20
7	Red edge 3	0.77 – 0.79	20
8	Near Infrared 1 (NIR 1)	0.78 – 0.90	10
8A	Near Infrared 2 (NIR 2)	0.85 – 0.87	20
9	Water vapour	0.93 – 0.95	60
10	Cirrus	1.36 – 1.39	60
11	Short wave Infrared 1 (Swir 1)	1.56 – 1.65	20
12	Short wave Infrared 2 (Swir 2)	2.10 – 2.28	20

- Exponer a la ciudadanía la importancia del hielo antártico y las consecuencias de su derretimiento con el aumento de las temperaturas globales.
- Fortalecer la conciencia e identidad antártica nacional, a través de la investigación científica escolar en nuestro establecimiento educacional.

Metodología

La descarga de imágenes se realizó desde la web del EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov/), que pertenece al Servicio Geológico de los Estados Unidos. Se seleccionaron imágenes de la isla Rey Jorge, de las fechas 29/12/2021 y del 20/11/2019. En ese sitio web se pueden obtener imágenes de distintos satélites y a su misma vez de diferentes años. Un punto importante, es que es necesario crearse una cuenta para poder descargar una imagen junto a sus bandas correspondientes.

Para descargar alguna imagen, se tiene que seleccionar un rango de fechas que se quiera analizar, después de eso, se tiene que limitar un bajo porcentaje de nubosidad que puede haber en una foto, posterior a esto, se tiene que seleccionar el satélite del cual se quiera la imagen. Habiendo seleccionado los parámetros que se requieren, se debe seleccionar entre alguna que favorezca el lugar que se desee analizar. Una vez descargada la imagen junto a sus bandas, se tiene que descargar y abrir el software de procesamiento GIS llamado "QGIS" que es gratis y abierto a todo público. Luego, para nuestro análisis cualitativo, utilizamos una de las técnicas más sencillas de la percepción remota que es la combinación de bandas. Para ello tuvimos que crear un raster virtual con las bandas del espectro visible (Blue-Green-Red) y el infrarrojo cercano (NIR) para poder realizar realces sobre la vegetación que permitan discriminar visualmente de mejor manera. Debido a que las propiedades reflectivas de las colonias de microalgas hacen que su mayor porcentaje de reflectancia lo tengan en el NIR, pusimos dicha banda en el canal verde, la banda roja en el canal rojo, y la

banda azul en el canal azul, para que la vegetación con mayor biomasa verde se vea de color verde intenso como se muestra en la Fig. 7 en el caso de la zona central de Chile.

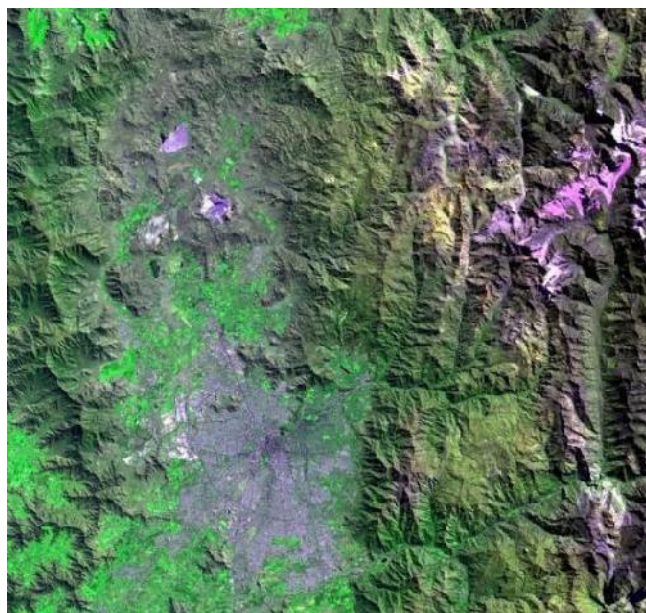


Figura. 7 | Combinación de bandas en falso color R-NIR-B en canales RGB. Esta combinación permite realzar las grandes concentraciones de biomasa verde en verde intenso debido a que la vegetación refleja más en el infrarrojo cercano. Adicionalmente la nieve adquiere tonalidades rosas. Elaboración propia.

Luego, para detectar con mayor precisión las algas, calculamos el Índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) a través de la calculadora ráster Fig. 8 de acuerdo con la siguiente fórmula (Fórmula 1):

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR + \rho RED}$$

Formula 1 | Índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI).



Figura. 8 | Ejemplo de cálculo de NDVI utilizado la calculadora ráster del software QGIS

El índice NDVI ocupa las bandas 4 (Red) y 8 (NIR). Después de que finalice, se mostrará una imagen en escala de grises con valores que pueden ir de -1 a 1 (ya que es normalizado) en el que los valores positivos sobre 0.2 de NDVI corresponden a vegetación.

Para cambiarle los colores se debe apretar la capa que se creó, abrir la simbología, ahí las bandas que aparecen en la izquierda (Fig 9) en donde se debe seleccionar en la parte superior “tipo de redendizador” y seleccionar el que dice “pseudocolor monobanda” después, se debe seleccionar la “interpolación”, se pasa de “lineal” a “discreto”, luego se eliminan todos los valores intermedios que aparecen en la parte inferior. Después de esto, deberán quedar dos valores, el menor y el mayor de la imagen. El que está arriba es el menor y se debe cambiar su valor a 0.2 para que los píxeles que tengan un índice mayor a este reflejen los colores que se elijan. Posterior a esto, se cambiará la opacidad del valor mínimo, bajándole lo máximo posible. Una vez hecho esto se mostrará una imagen con el color resaltado que se eligió.

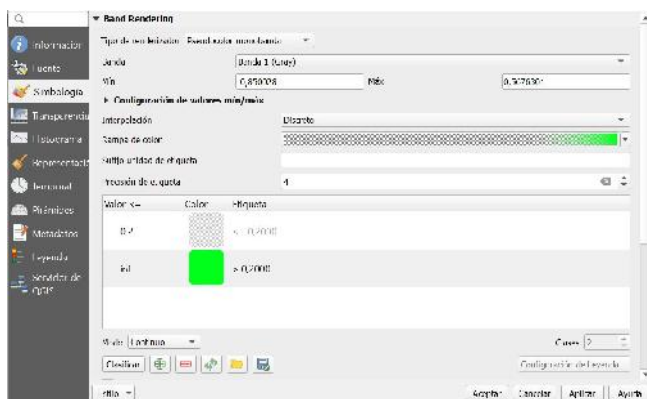


Figura 9 | Ejemplo de cómo se debería mostrar la simbología una vez estén hechos todos los arreglos.

Al tener la imagen satelital procesada, con la capa virtual y el índice (NDVI), se puede calcular la cantidad de píxeles que están coloreados con el índice mayor a 0.2, para hacer esto, se necesita ir a la caja herramientas y buscar la opción de “reclasificar por tabla”, donde se elegirá la capa de índice.

Una vez elegida la opción, se creará una tabla donde se añadirán 2 filas, la primera tendrá un valor mínimo de -1 y un valor máximo de 0.2 y a esos píxeles se les dará un valor de 0. En la segunda fila, el valor mínimo que se le asignará será de 0.2 y el máximo de 1, a estos se les dará un valor de píxel

1. Esto se hace para poder organizar los píxeles según los valores que reflejan en el índice, de manera que se

dividen entre aquellos que tengan un valor que puede tener microalgas, y aquellos que no pueden tener o tienen una baja probabilidad. Una vez terminada la tabla, se deberá seleccionar el botón de ejecutar, y se le dará automáticamente el nombre de “Ráster reclasificado”. Habiendo reclasificado los píxeles, junto con agregar su capa, se deberá abrir la función de “SCP Plugin” en donde se selecciona “postprocesamiento”, luego se selecciona “reporte de clasificación” y en la opción que da a elegir la capa a la cual se le quiera aplicar el reporte, se elegirá la que se creó recién. De esta forma, se calculará una tabla con la cantidad de píxeles que están con un valor de 0 y a su misma vez, la cantidad de píxeles que reflejan un valor de 1. Además, esta tabla también calculará la cantidad de porcentaje de cada valor asignado con respecto al total de la imagen, así como la cantidad de metros cuadrados que los píxeles cubren con sus respectivos valores. (tablas comparativas).

Resultados

Es de conocimiento público que la Antártica es una zona que se ha mantenido desierta durante mucho tiempo, lo que genera que su flora y fauna sean todavía desconocidas para el ser humano. A su vez, el deshielo de las acumulaciones masivas de nieve y hielo han tenido un gran impacto en los procesos físicos y biológicos en los entornos cercanos a las costas de la península antártica. Esto ha dado paso tanto a un aumento de colonias de diferentes variedades de microorganismos, como a un aumento en la floración de microalgas sobre la nieve, coloreando si está de rojo o verde, dependiendo de la composición de los pigmentos que éstas tengan. Es a través de estos distintos efectos, que uno puede dar cuenta de las dimensiones y el impacto que se están produciendo en el ecosistema antártico. El hecho de que haya un crecimiento progresivo de microalgas en las costas del continente blanco es preocupante, de modo que se tiene que hacer un llamado a la ciudadanía, para informarse sobre esto y actuar en pos de lograr un reconocimiento de los problemas que están sucediendo en la Antártica.

Es por esto que la metodología presentada puede ser ocupada para poder visualizar los cambios y variaciones que han tenido las colonias de microalgas presentes en las costas de las islas Shetland del Sur. Esto teniendo en cuenta que las imágenes deben ser tomadas en un mismo mes con una diferencia de gran cantidad de años, para poder evidenciar algún tipo de fenómeno que juegue un rol en el ecosistema, como lo podría ser el cambio climático.

Una vez detectadas las zonas con mayor índice de vegetación, esperamos encontrar en estos lugares crecimiento masivo de microalgas y luego poder determinar en campo, cuáles son las principales razones por las que se produce este crecimiento de las microalgas, deduciendo que éstas podrían ser:

- Retroceso de glaciares, dejando zonas libres de hielo y nieve.
- Formación de pozas de agua que, debido a los deshielos, propicien un ambiente ideal para el crecimiento de algas.
- Un suelo óptimo para el crecimiento de vegetación (idealmente recoger muestras de suelo para analizar pH y materia orgánica)
- Corroborar si en estos lugares hay poblaciones de animales que, a través del aporte de guano, generen nutrientes para la proliferación y crecimiento de las algas.

En la última parte de nuestra investigación, a través de un albedómetro, realizaremos mediciones de radiación solar para comparar los datos entregados por la teledetección y así poder tener un mapa de vegetación en la Isla Rey Jorge y en el mismo, indicar cuáles son las causas de la floración y crecimiento de las microalgas que allí se encuentran.

Nuestra intención con este estudio es contribuir a visibilizar en la ciudadanía, el impacto que generan las alteraciones en el ecosistema antártico y que este, se vea reflejado en las actividades diarias de cada persona a través del cuidado del ambiente, ya que no existe la educación ambiental necesaria para poder generar un cambio en nuestro estilo de vida.

Alonso, C. V. (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. Teledetección. Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección, 429-432. <http://www.aet.org.es/congresos/viii/alb99.pdf>

British Antarctic Survey (BAS) is a component of the Natural Environment Research Council (NERC). (05 de agosto de 2021). British Antarctic Survey (BAS) is a component of the Natural Environment Research Council (NERC). <https://www.bas.ac.uk/?s=artificial+sate-llites>

Cook, J., Hodson A., Gardner A., Flanner A., Tedstone A., Williamson C., Irvine-Fynn T., Nilsson J., Bryant R. y Tranter M. Quantifying bioalbedo: a new physically based model and discussion of empirical methods for characterising biological influence on ice and snow albedo. (2017). The Cryosphere, 11(6), 2611–2632. <https://doi.org/10.5194/tc-11-2611-2017>
Cook, J. M., Hodson, A. J., Taggart, A. J., Mernild, S. H., and Tranter, M.: A predictive model for the spectral “bioalbedo” of snow. (2017) J. Geophys. Res.-Earth Surf. 122, 434–454, <https://doi.org/10.1002/2016JF003932>

Cordero R., Sepúlveda E., Feron S., Damiani A., Fernandoy F., Neshyba S., Rowe P., Asencio V., Carrasco J., Alfonso J., Llanillo P., Wachter P., Seckmeyer G., Stepanova M., Carre-ra J., (2022) Black carbon footprint of human presence in Antarctica. <https://www.nature.com/articles/s41467-022-28560-w>

Davey M., Norman L., Sterk P., Huete-Ortega M., Bunbury F., Kin Wai Loh B., Stockton S., Peck S., Convey P., Newsham K. and Smith A. (2019) Snow algae communities in Antarctica: metabolic and taxonomic composition. New Phytologist, 222, 1242-1255 <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/nph.15701>

Donaire J. (2021), Carga Sedimentaria de los Icebergs de Bahía Fildes Antártica y su efecto sobre su tasa de derretimiento. Universidad Andrés Bello: Facultad de Ingeniería, Escuela de Ciencias de la Tierra, Viña del Mar, Chile.
Earth observatory sistem <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>

Fragão J., Bessa F., Otero V., Barbosa A., Sobral P., Waluda C., Guímaro H., y Xavier J. (2021) Microplastics and other anthropogenic particles in Antarctica: Using penguins as biological samplers. Science of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147698>

Fretwell P., Convey A., Fleming H., J. Peat K., Hughes A. (2021) Detecting and mapping vegetation distribution on the Antarctic Peninsula from remote sensing data. Polar Biol 34:273–281 <https://doi.org/10.1007/s00300-010-0880-2>

Ganey, G. Q., Loso, M. G., Burgess, A. B., and Dial, R. J. (2017): The role of microbes in snowmelt and radiative forcing on an Alaskan icefield, Nat. Geosci., 10., 754–759. <https://doi.org/10.1038/NGEO3027>, 2017.

Gray, A., Krolkowski, M., Fretwell, P. et al. (2020) Remote sensing reveals Antarctic green snow algae as important terrestrial carbon sink. Nat Commun 11, 2527. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16018-w>

Hernández Palma, J. (2007). PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES. En J. Hernández, C. De la Maza, & C. Estados, Manejo y Conservación de Recursos Forestales (pág. 803). Santiago de Chile: Editorial Universitaria.

Hodson, A. J., Nowak, A., Sabacka, M., Cook, J., Wharfe, E. S., Pearce, D. A., Convey, P., and Viera, G. (2017) Microbes influence the biogeochemical and optical properties of maritime Antarctic snow, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 122, 1456–1470.

Hodson, A. (2006), Biogeochemistry of snowmelt in an Antarctic glacial ecosystem, *Water Resour. Res.*, 42, W11406, doi:10.1029/2005WR004311.

Huovinen, P., Ramírez J., Gómez I. (2018) Teledetección de algas nivales reductoras de albedo e impurezas en la Antártida Marítima. *Revista de Fotogrametría y Teledetección de la ISPRS*, 146, 507-517.

Santamaría, J. Forzamiento Radiativo y Cambios Químicos en la Atmósfera. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat.*, 104 (1):149-173

Khan, A. L., Dierssen, H. M., Scambos, T. A., Höfer, J. & Cordero, R. R. (2021) Spectral characterization, radiative forcing and pigment content of coastal Antarctic snow algae: approaches to spectrally discriminate red and green communities and their impact on snowmelt. *Cryosphere* 15, 133–148. <https://doi.org/10.5194/tc-15-133-2021>

Lutz, S., Anesio, A. M., Edwards, A. & Benning, L. G. (2016) Linking microbial diversity and functionality of arctic glacial surface habitats. *Environ Microbiol.* 19 (2):, 551–565

Lutz, S. , Anesio, A., Raiswell, R. et al. (2016) The biogeography of red snow microbiomes and their role in melting arctic glaciers. *Nat. Commun.* 7, 11968 DOI: 10.1038/ncomms11968.

Remias, D., Holzinger A., and Lutz, C. (2009) Physiology, ultrastructure and habitat of the ice alga *Mesotaenium berggrenii* (Zygnema- phyceae, Chlorophyta) from glaciers in the European Alps, *Phycologia*, 49, 302–312.

Remias, D., Schwaiger, S., Aigner, S., Leya, T., Stuppner, H., and Lutz, C. (2012) Characterization of an UV- and VIS-absorbing, purpurogallin-derived secondary pigment new to algae and highly abundant in *Mesotaenium berggrenii* (Zygnematophyceae, Chlorophyta), an extremophyte living on glaciers, *FEMS Microbiol. Ecol.*, 79(3): 638–648, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01245.x>

Scientific Committee on Antarctic Research. <https://www.scar.org/>

Soto D., Franzetti A., Gómez I., Huovinen P. (2022). La alteración funcional y los procesos aleatorios afectan al ensamblaje de las comunidades microbianas de las floraciones de algas de nieve en la Antártida Marítima. *Science of the Total Environment*, 805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150305>

Steinmetz S. B.Sc. (2018), The Role of Algae in the context of Bioalbedo: Taxonomy, Pigmentation and Productivity. Universität Innsbruck, Institute of Ecology, - Faculty of Biology, Innsbruck, Austria.

USGS, Science for a changing world. EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Yallop, M. L., Anesio, A. J., Perkins, R. G., Cook, J., Telling, J., Fagan, D., MacFarlane, J., Stibal, M., Barker, G., Bellas, C., Hodson, A., Tranter, M., Wadham, J., and Roberts, N. W. (2012) Photophysiology and albedo changing potential of the ice-algal community on the surface of the Greenland ice sheet., *ISME J.* 6, 2302–2313.



USACH



Brotes Científicos

REVISTA DE INVESTIGACIONES ESCOLARES

Artículo de Investigación
Research Article

ISSN 0719-8558

Vol. 7

Pag. 25-38 (2025)

Ciencias Naturales

Pandemia Silenciosa

SILENT PANDEMIC



Estudiantes

Jacob Santander 3°B
Francisca Quijada 3°B
Román Rivera 3°D
Paulo Milla 3°A
Poulette Valdés 3°A
Esteban Montaña 3°A
Emilia Collao 3°B
Luis Olivares 3°C
Felipe Sandoval 3°C

Profesor guía

Verónica
Espinoza
vmec8862@gmail.com

Asesor científico

Víctor Aguilera CEAZA

- Artículo Recibido: 3 de diciembre, 2021
- Artículo Aceptado: 31 de diciembre, 2021
- Artículo Publicado: 20 de agosto, 2022

El Proyecto participó en

- * Congreso Regional Escolar de la Ciencia y la Tecnología 2022, PAR Explora de CONICYT Region de Coquimbo.
- * XIII Congreso Ferial Científico Astronómico ICEDUC en Antofagasta



Resumen

Nuestro trabajo tiene como propósito investigar el efecto de la acumulación de CO_2 durante el transcurso de la clase, considerando factores como la densidad de estudiantes, el tamaño de la sala y la falta de una adecuada ventilación, los cuales pueden repercutir en el rendimiento académico. Para ello, se realizó un trabajo práctico destinado a responder la siguiente pregunta de investigación: "¿Puede la acumulación de CO_2 proveniente de la respiración de los estudiantes afectar el desempeño o rendimiento académico en ausencia de ventilación?"

La hipótesis propuesta sostiene que una alta densidad de estudiantes y la escasa ventilación en la sala de clases provocan un exceso de CO_2 en este espacio físico, lo que afecta negativamente el grado de concentración de los estudiantes.

El objetivo de nuestro trabajo es contribuir a un mejor entendimiento de los factores internos del establecimiento que afectan el rendimiento académico de los estudiantes. En específico, se estudiaron aspectos de la ventilación (acumulación de CO_2) en las salas de clases y su relación con el grado de concentración de los estudiantes durante el desarrollo de la clase.

Como resultado, se observó un efecto significativo de la ventilación y la densidad de estudiantes en la acumulación de CO_2 durante la clase. Esto evidencia una correlación significativa entre la acumulación de CO_2 y la atención de los estudiantes, indicando una disminución de la concentración a medida que aumenta el nivel de CO_2 .

→ Palabras claves

CO_2 , concentración de los estudiantes, ventilación..

Abstract

Our study aims to investigate the effect of CO_2 accumulation during lessons, considering factors such as student density, classroom size, and inadequate ventilation, all of which can impact academic performance. To this end, we conducted a practical investigation designed to address the following research question: "Can the accumulation of CO_2 from students' respiration affect academic performance in the absence of ventilation?"

The proposed hypothesis states that high student density and poor ventilation in the classroom lead to an excess of CO_2 in this physical space, which negatively affects students' concentration levels.

The objective of our work is to contribute to a better understanding of internal school factors that influence students' academic performance. Specifically, we examined aspects of classroom ventilation (CO_2 accumulation) and their relationship with students' concentration during lessons.

As a result, we observed a significant effect of ventilation and student density on CO_2 accumulation during lessons. This provides evidence of a significant correlation between CO_2 accumulation and students' attention, indicating a reduction in concentration as CO_2 levels increase.

→ Keywords

CO_2 , Student concentration, Ventilation.

Introducción

El presente estudio surge durante una conversación previa al ingreso a clases acerca de cómo mejorar a grado el desempeño de los estudiantes. En la legislación actual sobre la higiene en las aulas no consta de directrices sobre la correcta ventilación de las salas (ministerio de salud 1983). En este contexto se nos presentó la oportunidad de medir uno de los factores internos como es la acumulación de CO₂, ya que es bien sabido que puede causar efectos como dolor de cabeza y cansancio (Norbäck et al. 2012), inclusive si los estudiantes están expuestos a elevadas concentraciones de CO₂, superiores a 1000 ppm (Fisk y colaboradores, 2013; Krawczyk, y colaboradores, 2016), en ausencia de otras fuentes de CO₂ en interiores, han informado que pueden provocar también náuseas leves, somnolencia y disminución del rendimiento en la toma de decisiones. Esta problemática no es percibida debido a la naturaleza imperceptible e invisible de este gas, lo que nos motivó a medir la cantidad de CO₂ generados por los estudiantes mientras se desarrolla la clase con las condiciones que nos entrega el establecimiento y determinar si el CO₂ podría afectar el desarrollo normal de esta, por consiguiente la hipótesis quien argumenta nuestro trabajo señala que durante el transcurso de la clase, a medida que aumenta la concentración de CO₂ proveniente de la respiración del estudiante, afectará negativamente la atención de estos mismos. Para determinar cómo afecta la cantidad de CO₂ en el rendimiento se ha aplicado un instrumento aportado por la Psicóloga del Programa de Integración Escolar (imagen 2 y 3), quien señaló que “La aplicación del instrumento utilizado tiene por objetivo medir y trabajar la capacidad

de concentración de la persona evaluada”. Y para ponderar los resultados nos basamos en un porcentaje de logro obtenido a partir de este instrumento. “A medida que más faltas sean encontradas, será indicador de que presenta dificultades para sostener la concentración en un corto tiempo”. Para lo cual nos realizamos la siguiente pregunta de investigación ¿Puede la acumulación de CO₂ proveniente de la respiración del alumnado afectar el desempeño o rendimiento académico en ausencia de ventilación?

Hipótesis

La densidad de estudiantes y la poca ventilación en la sala de clases provoca exceso de CO₂ disponible en este espacio físico, lo que afecta negativamente el grado de concentración de los estudiantes.

¿Puede la acumulación de CO₂ proveniente de la respiración del alumnado afectar el desempeño o rendimiento académico en ausencia de ventilación?

Objetivo general

Contribuir a un mejor entendimiento de los factores internos del colegio que afectan el rendimiento académico de los estudiantes. Específicamente, estudiamos aspectos de la ventilación (acumulación de CO₂) de las salas de clases, y su relación con el grado de concentración de los estudiantes durante el desarrollo de esta.

Objetivos específicos

- 1. Medir la concentración de CO2 durante la clase (1 h)
- 2. Evaluar cambios en el rendimiento de los estudiantes durante la clase.
- 3. Estudiar la relación entre acumulación de CO2 y cambios en el rendimiento de los estudiantes.

Metodología

Nuestro trabajo se basó en una investigación cuantitativa (mediciones de CO2, temperatura, humedad, densidad de estudiantes, cuestionario de concentración) y cualitativa (ventilación, Tamaño de sala, ingesta de alimento).

En el objetivo 1 de la investigación: Medir la concentración de CO2 durante la clase (1 h) fue para cuantificar cambios en la concentración de CO2 para ello se efectuaron mediciones discretas en tres intervalos de tiempo durante el desarrollo de la clase de 1 h. Tiempo 1 que corresponde al inicio de la clase, Tiempo 2 que corresponde a 30 min después del inicio de la clase, y Tiempo 3 que corresponde al término de la clase (60 min). La concentración de CO2 fue medida con un

detector de CO2 Portátil (imagen 1) el cual además mide la temperatura y humedad del aire. Para cada intervalo de tiempo se tomaron 3 réplicas (mediciones), (c/1 min).



Imagen 1: detector de calidad del aire digital

Factores adicionales a la variabilidad en la concentración de CO2 son la cantidad de estudiantes que asisten a las clases, el tamaño y ventilación de la sala. Para establecer la cantidad de estudiantes se utilizó la lista de asistencia. El tamaño de la sala de clases se clasificó en grande” sala de uso común” (178,2 m3) (foto 1) y pequeña “sala temática ciencia” (153,03 m3) (foto 2). La ventilación se relaciona con mantener la puerta abierta (foto 3) o por la cantidad de veces que se debe abrir por retiro o ingreso de estudiantes (con ventilación) o cerrada (foto 4) (sin ventilación).

Tabla 1: En esta tabla se hace referencia a todas las variables estudiadas en cuestión.

Cantidad de experimentos	Variables tomadas en consideración	Instrumentos Utilizados	Tiempo de desarrollo del experimento	cantidad de réplicas del experimento
14	Tiempo	Medidor CO2 (Revisar anexo 1)	Al inicio	3 (Tiempo 1)
	CO2	Cuestionario 1 (Revisar anexo 3)	A los 30 Min.	3 (Tiempo 2)
	Ventilación (puertas y ventanas abiertas)	Cuestionario 2 (Revisar anexo 40)	A los 60 Min.	3 (Tiempo 3)
	Densidad de estudiantes			
	Tamaño de las salas			



Foto 1: sala “grande” de uso común, estudiantes realizando test (foto tomada por Román Rivera)



Foto 2: Sala “pequeña” sala temática de ciencias (foto tomada por Felipe Sandoval)



Foto 3: Con ventilación (Foto tomada por Felipe Sandoval)



Foto 4: Sala sin ventilación (foto tomada por Román Rivera)

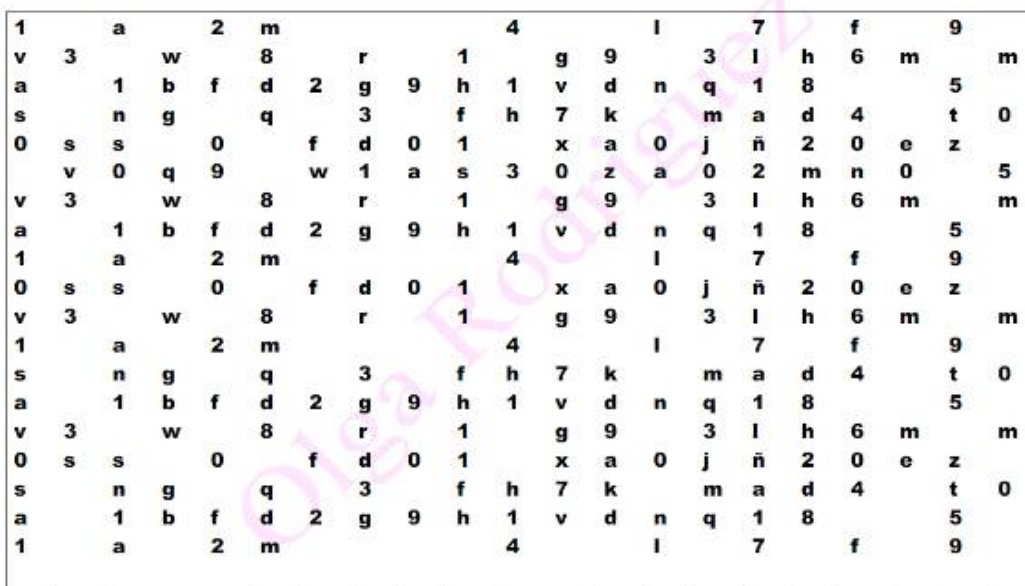
En el segundo objetivo fueron evaluados los cambios en el rendimiento de los estudiantes durante la clase. Se aplicó una actividad para determinar la atención de los estudiantes (ver imagen 2 y 3) (foto 1), utilizadas por las psicólogas del establecimiento para observar posibles cambios en el rendimiento de los estudiantes el cual consiste en rodear con un círculo cada número dentro de un campo de letras de la misma fuente (ver imagen 2) o contar cuántos asteriscos, círculos o estrellas hay en la hoja (ver imagen 3) durante un minuto

y medio. Esto era repetido tres veces, con la toma respectiva de datos (tabla 2). Para tener una muestra aleatoria de los estudiantes en esta actividad, se efectuó un sorteo (en una bolsa se sacaron todos los números según la cantidad de estudiantes en la clase y se tomaban 3 por día). Este procedimiento seleccionó a tres participantes y se repite en cada medición de CO₂. Los estudiantes que fueron seleccionados no fueron incluidos en la actividad subsiguientes.

Ha habido poco estudio del uso medicinal popular de



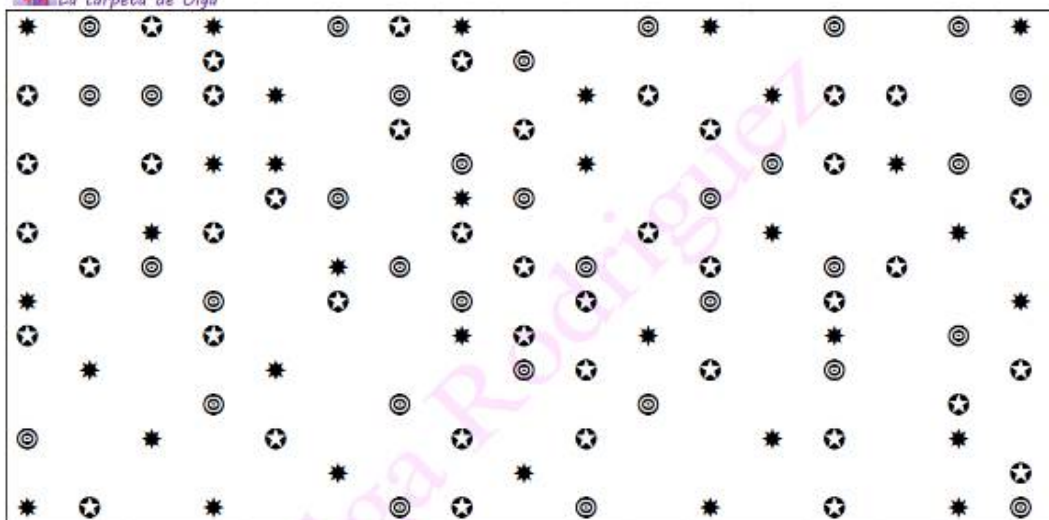
Rodea con un círculo todos los números



<http://olgarodriguez-olga.blogspot.com/>

20 --

Imagen 2: actividad para determinar el grado de concentración de los estudiantes



¿Cuántos hay?

★	⊙	★

<http://olgarodriguez-olga.blogspot.com/>

21 --

Imagen 3: Actividad para determinar el grado de concentración de los estudiantes

Tabla 2: Registro de datos

Fecha	Tiempo	Hora	Respuestas %	CO2	Temp. °C	densidad	ventilación	mt2	observaciones
10-08	1	10:35	99	440	20	21	Con	Pequeña	Se abrió 2 veces la puerta para ingresar a 2 estudiantes
10-08	1	10:35	100	443	20	21	Con	Pequeña	Se retiraron 2 estudiantes, la puerta se abrió 8 veces (2 por inspección para retirar a los estudiantes) y 6 veces por razones administrativa del Liceo
10-08	1	10:35	94,69	449	20	21	Con	Pequeña	
10-08	2	11:00	96.46	906	17	23	Con	Pequeña	
10-08	2	11:00	68.14	961	17	23	Con	Pequeña	
10-08	2	11:00	100	994	17	23	Con	Pequeña	
10-08	3	11:25	99	449	17	21	Con	Pequeña	
10-08	3	11:25	74	441	17	21	Con	Pequeña	
10-08	3	11:25	98,23	442	17	21	con	Pequeña	
11-08	1	10:50	98,2	804	16	25	con	Pequeña	Ventana quebrada
11-08	1	10:50	89,4	928	16	25	Con	Pequeña	
11-08	1	10:50	88,5	895	16	25	Con	Pequeña	
11-08	2	11:10	100	448	16	25	Con	Pequeña	
11-08	2	11:10	100	449	16	25	Con	Pequeña	
11-08	2	11:10	99,1	443	16	25	Con	Pequeña	
11-08	3	11:30	100	448	16	25	Con	Pequeña	
11-08	3	11:30	100	445	17	25	Con	Pequeña	
11-08	3	11:30	99,1	532	17	25	con	Pequeña	
16-08	1	8:17	97.3	85	12	21	sin	grande	
16-08	1	8:17	99.1	873	12	21	sin	grande	
16-08	1	8:17	73.4	862	12	21	sin	grande	
16-08	2	8:32	100	2171	16	25	sin	grande	
16-08	2	8:32	100	2149	16	25	sin	grande	
16-08	2	8:32	76	2116	16	25	sin	grande	
16-08	3	8:55	100	2501	20	25	sin	grande	
16-08	3	8:55	99.1	2501	20	25	sin	grande	
16-08	3	8:55	85.8	2490	20	25	sin	grande	
17-08	1	10:53	50.4	636	16	22	sin	grande	la puerta fue abierta cuatro veces
17-08	1	10:53	60.1	642	16	22	sin	grande	
17-08	1	10:53	41.6	654	15	22	sin	grande	
17-08	2	11:15	100	443	18	19	sin	grande	

17-08	2	11:15	99.1	446	18	19	sin	grande	
17-08	2	11:15	90.2	449	18	19	sin	grande	
17-08	3	11:30	91.1	448	18	19	sin	grande	
17-08	3	11:30	99.1	447	18	19	sin	grande	
17-08	3	11:30	92.9	449	18	19	sin	grande	
18-08	1	10:43	98.2	446	15	19	sin	grande	fue abierta una vez la puerta
18-08	1	10:43	86.7	448	15	19	sin	grande	
18-08	1	10:43	97.3	449	15	19	sin	grande	
18-08	2	11:00	100	2570	18	21	sin	grande	
18-08	2	11:00	88.5	2688	18	21	sin	grande	
18-08	2	11:00	97.7	2688	18	21	sin	grande	
18-08	3	11:30	84	1918	19	21	sin	grande	
18-08	3	11:30	85.8	1984	19	21	sin	grande	
18-08	3	11:30	97.3	2006	19	21	sin	grande	
23-08	1	8:15	93.8	2831	12	23	con	grande	
23-08	1	8:15	91.1	3059	12	23	con	grande	
23-08	1	8:15	89.3	2617	12	23	con	grande	
23-08	2	8:35	100	445	12	25	con	grande	
23-08	2	8:35	95.5	440	12	25	con	grande	
23-08	2	8:35	98	441	12	25	con	grande	
23-08	3	8:55	99.1	576	12	25	con	grande	
23-08	3	8:55	95.5	510	12	25	con	grande	
23-08	3	8:55	94.7	587	12	25	con	grande	
24-08	1	10:45	28.4	4236	13	18	sin	grande	
24-08	1	10:45	58.7	4074	13	18	sin	grande	
24-08	1	10:45	29.3	4063	13	18	sin	grande	
24-08	2	11:07	25.3	4910	15	21	sin	grande	
24-08	2	11:07	97.2	4932	15	21	sin	grande	Estudiante recién entro en ese periodo
24-08	2	11:07	53.2	4932	15	21	sin	grande	
24-08	3	11:30	57.8	4679	17	21	sin	grande	
24-08	3	11:30	39.4	4690	17	21	sin	grande	
24-08	3	11:30	88.9	4690	17	21	sin	grande	

Dado que el cambio en el rendimiento, por ejemplo, el grado de atención durante la clase, también dependen entre otros factores de la alimentación previa a la clase, los estudiantes seleccionados en las actividades fueron consultados por la ingesta de alimentos (si o no) previo a la clase (cabe mencionar que, durante la creación de los modelos estadísticos y resultados finales, esta variable no fue tomada en consideración).

Los factores de variabilidad en la concentración de CO2 considerados fueron: tiempo, la cantidad estudiantes, la ventilación y tamaño de la sala.

Objetivo 3: Luego para estudiar la relación entre acumulación de CO2 y cambios en el rendimiento de los estudiantes se correlacionó los datos registrados por el instrumento detector de CO2 portátil durante el transcurso de las clases y los resultados obtenidos de la actividad de concentración. Los cambios en la concentración de CO2 y nivel de atención de los estudiantes con relación a los factores de variabilidad categóricos (tiempo, ventilación) y continuos (temperatura, densidad de estudiantes) se realizó mediante un modelo lineal mixto con el programa estadístico STATISTICA v 10.0.

Resultados

El modelo reprodujo (R^2) un 40% de la variabilidad del CO_2 . Se observaron diferencias significativas ($F_{2,55}=8.4$, $p=0.001$) en la concentración de CO_2 al inicio, mitad y término de la clase, y entre salas con y sin ventilación (Figura 1).

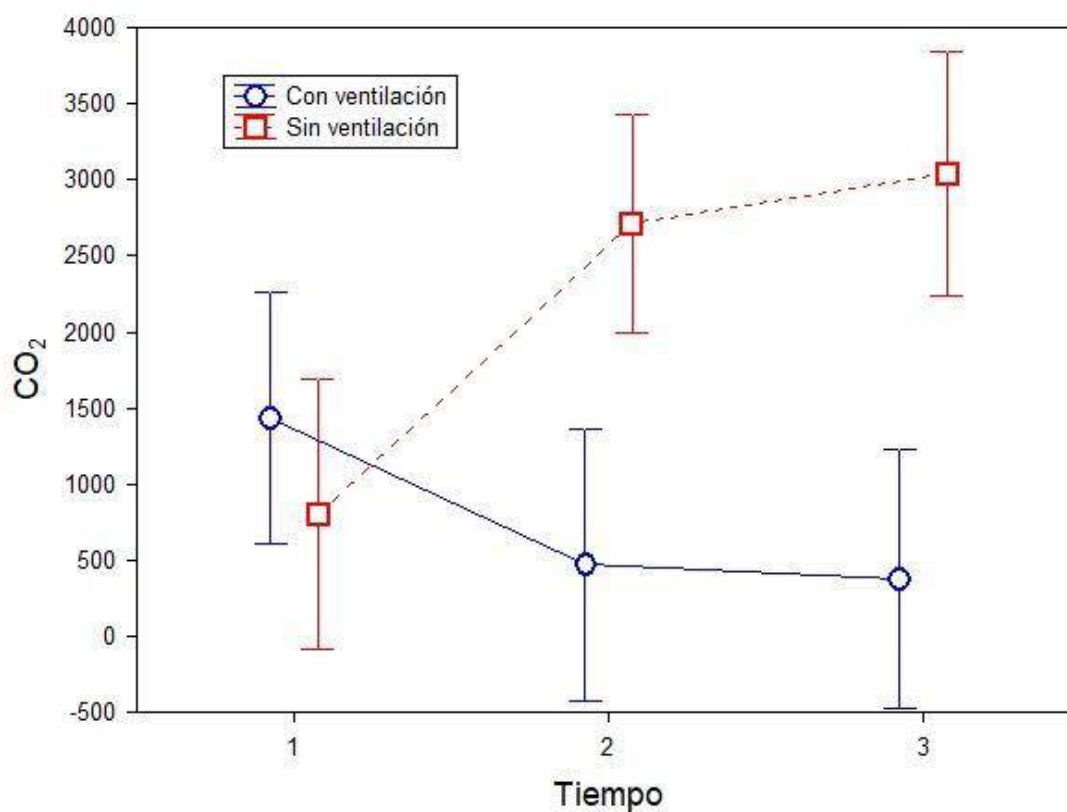


Figura 1: Variabilidad temporal en la concentración de CO_2 medida al interior de la sala durante la clase. El eje X indica el tiempo de medición de CO_2 al inicio (1), después de 30 (2) y 60 min (3).

La concentración de CO₂ fue mayor en salas sin ventilación. También la temperatura tuvo un efecto significativo en la concentración de CO₂. El modelo solo explicó el 26% de la variabilidad de la atención de los estudiantes. Se observaron diferencias significativas ($F_{1, 55}=5.1$, $p=0.03$) en la atención de estudiantes respecto de una sala con y sin ventilación (Figura 2). Encontramos una relación significativa ($r^2=0.3$, $p=0.0001$) entre la concentración de CO₂ y el nivel de atención de los estudiantes (Figura 3).

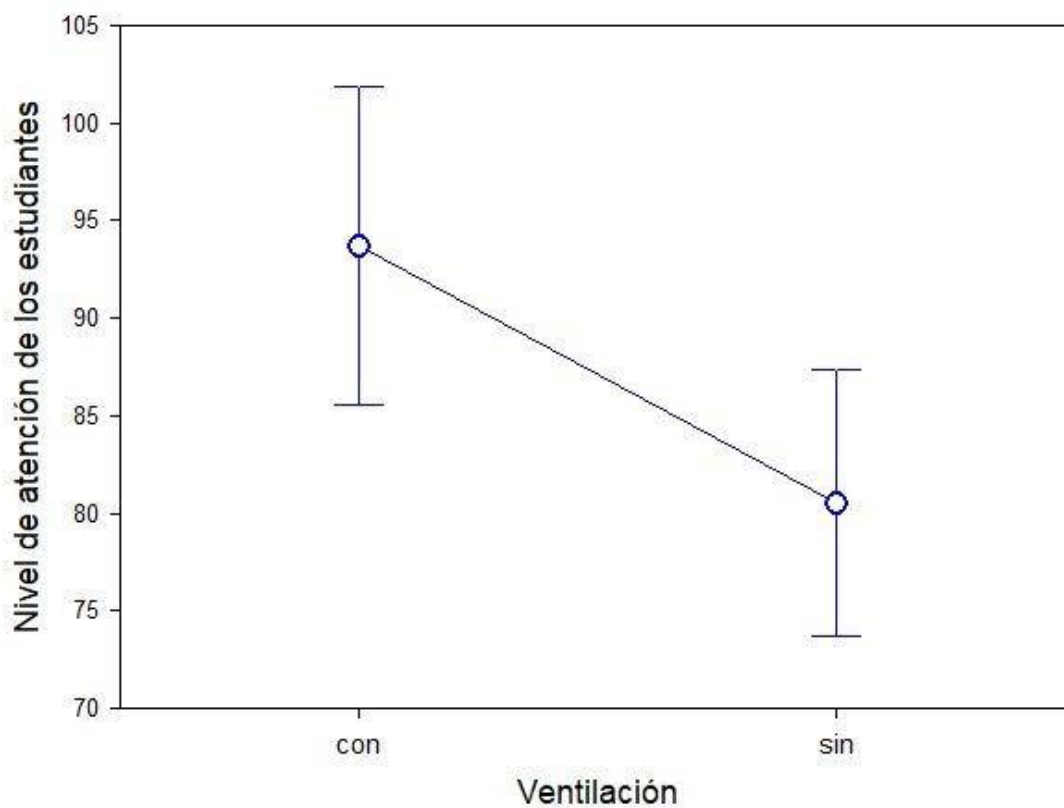


Figura 2: Efecto de la ventilación de la sala en el nivel de atención de los estudiantes.

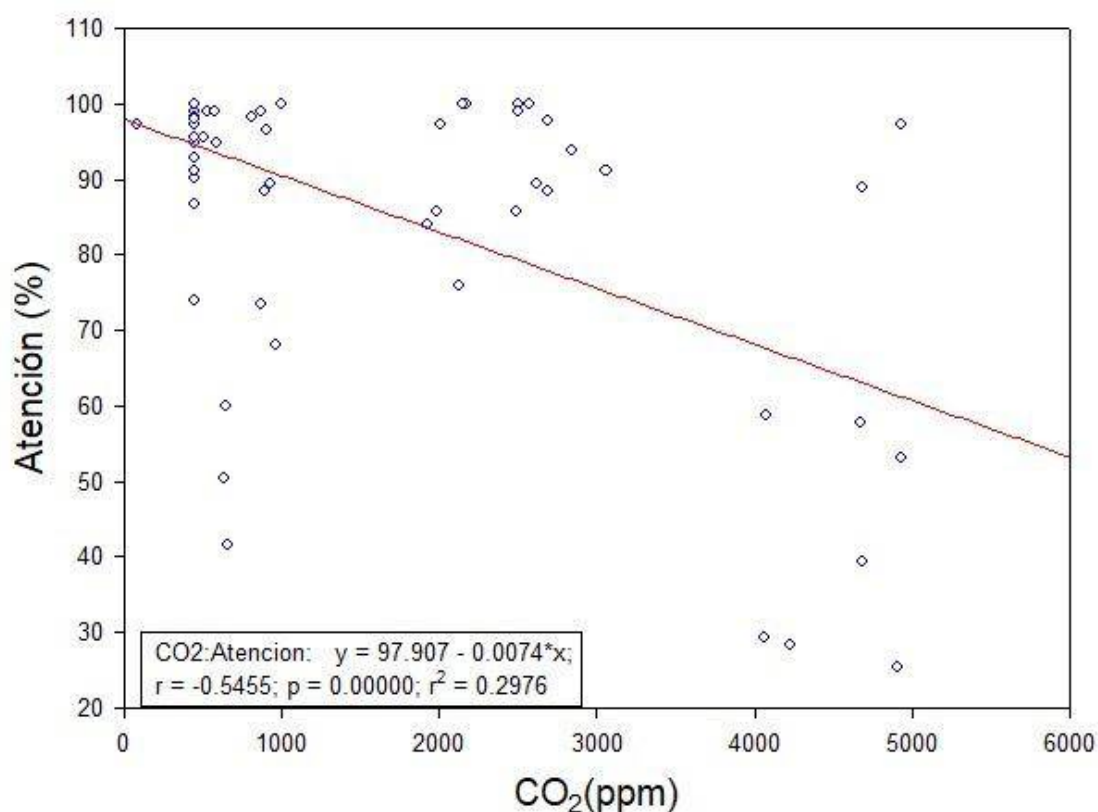


Figura 3: Correlación (Pearson) entre la concentración de CO₂ y nivel de atención de los estudiantes.

Existe una relación estrecha entre la ventilación y cantidad de CO₂, para ello podemos argumentar usando la figura 2 como referencia. Debido a que nos muestra como aumentan las concentraciones de CO₂ durante las tres etapas del experimento, ya que tiende a un aumento sostenido. Pero en su contraparte, cuando se lleva a cabo la implementación de la sala con ventilación podemos ver notoriamente como el CO₂ tiende a la baja, hasta llegar a niveles normales e inocuos. Y con respecto al nivel de atención de los estudiantes, podemos observar un descenso considerable cuando aumenta la concentración de CO₂ (figura 3). Podemos agregar que existe una proyección negativa de la atención de los estudiantes respecto a la concentración de CO₂, debido a que los mejores resultados se concentran en concentraciones menores, pero disipándose a medida que esta misma aumenta (figura 4). Esto nos indica que a medida que aumenta la concentración de CO₂ en las salas de clase la atención de los estudiantes disminuye.

Conclusión

En base a los resultados obtenidos en base a una ardua investigación; hemos llegado a la conclusión que la cantidad de CO₂ liberado por la respiración de los estudiantes en la sala de clases, aumenta durante el transcurso de esta misma y afecta en gran medida el nivel de atención de ellos mismos. Dicha aseveración fue corroborada al aplicar el instrumento para medir la capacidad de concentración la cual se aplicaba al inicio a media clase y al término de ella. Además, hemos podido evidenciar el aumento sostenido de la concentración de CO₂ cuando se encontraban los estudiantes sin ventilación (puertas y ventanas cerradas) (foto 5).



Foto 5: Medidor de la calidad de aire marcando en sala sin ventilación (foto tomada por Verónica Espinoza)

El uso de la computadora, proyector y teléfonos celulares, por parte de los estudiantes y docentes, puede también afectar la cantidad de CO₂ contenido dentro de una sala de clases. Según Mike Berners-Lee, director y principal consultor del Small World Consulting y experto en huella de gases de efecto invernadero y desarrollo organizacional señala que el celular por 2 minutos de uso libera 47 gramos de dióxido de carbono, por lo tanto, por una hora serían casi 1,5 kilos de dióxido de carbono (Berners-Lee 2021) y el computador por hora y encendido libera entre 52 y 234 gramos (según la comisión europea).

Además, podemos señalar que pueden existir otras variables que pueden afectar el desempeño académico (ninguna de estas variables fue considerada en este proyecto), por ejemplo

- Eestudiantes que ingresan al establecimiento sin haber ingerido alimentos
- Eestado de salud
- Problemas familiares

Bibliografía

Berners-Lee, M. et al. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. ScienceDirect

Ministerio de salud. (1989). Decreto 289. Aprueba el reglamento sobre condiciones sanitarias mínimas de los establecimientos educacionales y deroga el decreto N°462, de 1983. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Soledispa Villegas, J. (2020). Análisis de niveles muy altos de CO2 en las aulas de clases mediante el sensor MQ-135. Repositorio Universidad de Guayaquil.

Fisk, et al. (2004). Associations between classroom CO2 concentrations and student attendance in Washington and Idaho. Lawrence Berkeley National Laboratory

Unocero. (2019). #EcoTech



Evaluación de los Efectos del Plomo en El Desarrollo de la Cebolla (*Allium Cepa*) para una Productividad Agrícola Sostenible

ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF LEAD ON THE DEVELOPMENT OF ONION (ALLIUM CEPA) FOR SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRODUCTIVITY



Estudiantes

Maite Jorquera 8°
Amanda Monasterio 8°
Juan José Tapia I Medio
Ignacia Maquieira 8°

Profesor guía

Guillermo Vidal Astudillo
guillermo.vidal.astudillo@gmail.com

Asesor científico

Miriam Estrada
The Kent School
Providencia Región metropolitana

- Artículo Recibido: 3 de diciembre, 2021
- Artículo Aceptado: 31 de diciembre, 2021
- Artículo Publicado: 20 de agosto, 2022

El Proyecto participó en

- * XVI Congreso Regional Explora de Investigación e Innovación escolar Región Metropolitana Norte, 2022.
- * XXI Congreso Nacional EXPLORA de Investigación e Innovación escolar Chile, 2023.



Resumen

El plomo, un agente mutagénico, puede provocar la intensificación de la función de genes reguladores, generando una proliferación celular descontrolada que podría derivar en la formación de tumores, causando fallos fisiológicos y un mayor gasto energético en organismos pluricelulares (Rey et al., 2017). La literatura reporta altas concentraciones de elementos tóxicos en las aguas de la cuenca del río Maipo; se establece que en el 80 % del agua potable de Santiago, el arsénico sobrepasa en un 5 % la norma chilena y el plomo excede en un 170 % los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Este elemento puede disolverse en el agua potable debido al desgaste y la erosión de las tuberías del servicio.

En el experimento se expondrá *Allium cepa* a nitrato de plomo en disolución acuosa con el objetivo de comparar sus efectos sobre el diámetro del bulbo, el crecimiento de la raíz y el tallo, y la biomasa. Gracias a este proyecto podremos inferir cómo el plomo puede afectar la productividad agrícola de *A. cepa*, ya que al verse comprometida su calidad, se generaría una disminución en la oferta de esta hortaliza, con el consiguiente aumento de su precio, afectando la dieta de la población chilena y dificultando el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible “Hambre Cero”.

→ Palabras claves

Plomo; Allium cepa; Toxicidad ambiental; Productividad agrícola

Abstract

Lead, a mutagenic agent, can intensify the function of regulatory genes, generating uncontrolled cell proliferation that may result in tumour formation, causing physiological failures and increased energy expenditure in multicellular organisms (Rey et al., 2017). The literature reports high concentrations of toxic elements in the waters of the Maipo River basin. It is established that in 80% of Santiago's drinking water, arsenic exceeds the Chilean standard by 5%, and lead surpasses the levels recommended by the World Health Organisation by 170%. This element can dissolve into drinking water due to pipe wear and erosion. In the experiment, *Allium cepa* will be exposed to lead nitrate in aqueous solution to compare its effects on bulb diameter, root and stem growth, and biomass. Through this project, we aim to infer how lead may impact the agricultural productivity of *A. cepa*, since reduced quality would lead to a decrease in supply, a price increase, and consequently affect the Chilean population's diet, hindering progress towards the Sustainable Development Goal of “Zero Hunger”.

→ Keywords

Lead, Allium cepa, Environmental toxicity, Agricultural productivity

Introducción

Los factores mutagénicos, como el plomo, pueden provocar una supresión o intensificación de la función en los genes reguladores del ciclo celular, causando una descontrolada proliferación, derivando en un tumor. Los tumores generan un gran gasto energético y fallas fisiológicas en los organismos pluricelulares (Universidad de Emory, 2022). Según un estudio se evidenció altas concentraciones de elementos tóxicos en las aguas de la cuenca del río Maipo, el cual abastece el 80% del agua potable de Santiago, el arsénico sobrepasa en un 5% la norma chilena y el plomo supera en un 170% los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (Larraín, 2016). Este químico se disuelve en el agua potable cuando las tuberías del servicio se desgastan por efecto de la erosión. Los efectos del plomo sobre los humanos son patologías de origen hematológico, como por ejemplo anemia, glóbulos rojos microcíticos e hipocrómicos o inactivación de enzimas del grupo hemo (Villacis, 2018). Actualmente, hay “límites máximos” permisibles en la concentración de metales pesados establecidos por la unión europea (UE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), varían de acuerdo con el tipo de alimento, en el caso de las hortalizas de bulbo, el límite máximo de plomo es de 0,1 mg/kg (Reyes et al, 2016). Una de las causales responsables de la incorporación de metales pesados en los alimentos es el sistema hídrico, ya sea por uso de aguas contaminadas para riego de cultivos o por los procesos de erosión de las cañerías de plomo. Numerosos estudios resaltan el gran interés y preocupación por la necesidad de evaluar la contaminación de metales pesados en sistemas de agua que interactúan con productos de consumo humano, tales como los alimentos de origen vegetal y animal (Reyes et al, 2016).

Como equipo estamos muy motivados en demostrar y prevenir los peligros de la concentración de plomo en el agua sobre las plantaciones agrícolas en la especie *Allium cepa*, alimento esencial en la dieta de los chilenos y chilenas. Con el fin de poder evitar pérdidas significativas de alimentos y alza del precio de esos productos, disminuyendo la accesibilidad para personas de bajos recursos. También proteger la salud de los consumidores que podrían verse gravemente afectados tras su consumo de una cebolla.

Ante este desafío se nos ocurrió como un metal pesado con características mutagénicas podría afectar a una hortaliza, ya que era un tema que nos parecía interesante en términos económicos y se sabe que la dieta es una de las principales causas de cáncer (Granados et al., 2006). Además, en este último tiempo ha habido un alza de los precios en los alimentos de origen agrícola en este último tiempo (La Tercera, 2022). Y a partir de lo anterior, ¿Puede haber sido la concentración de metales pesados en el agua potable?, esta pregunta tiene una respuesta a través de una revisión bibliográfica, como es el caso del estudio donde se evidenció que el agua potable de Chile presenta altas concentraciones de estos metales (Larraín, 2016) y en otros casos en el mundo; como por ejemplo, en la población infantil de Torreón, Coahuila ubicada en Norte-centro de México se han reportado casos por envenenamiento principalmente por plomo proveniente de actividades industriales donde, por bioacumulación, se incorpora este metal a la cadena alimenticia (Reyes et al, 2016). Esto demuestra el peligro y lo que podría acontecer si alguna hortaliza se ve afectada por plomo, poniendo en riesgo la salud de los consumidores.

Por lo tanto, nuestra pregunta de investigación es ¿Cómo afecta el nitrato de plomo en disolución acuosa en el desarrollo de *Allium cepa*? Ante una posible respuesta a nuestra pregunta de investigación planteamos la siguiente hipótesis “Si se exponen *Allium cepa* en un medio con nitrato de plomo diluido en agua, entonces su biomasa, longitud y perímetro del bulbo se verán afectados, disminuyendo su variación en el crecimiento en comparación a cebollas expuestas solo a agua destilada”. Para someter a prueba nuestra hipótesis, el objetivo de la investigación es comparar los efectos en el crecimiento de cebollas expuestas a nitrato de plomo, agente mutagénico presente en altas concentraciones en el agua potable de Chile.

Chile es un país subdesarrollado miembro de la ONU que debe cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Uno de los ODS es “Hambre Cero”, que busca poner fin a todas las formas de malnutrición, duplicar la productividad agrícola y “aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción” (ONU, 2022). Así, gracias a este proyecto podemos inferir si el plomo pudiese incidir en la productividad agrícola, lo cual disminuiría la calidad de la cebolla, bajando la oferta de esta hortaliza, así aumentando su precio y poniendo en riesgo su sostenibilidad comercial, siendo una hortaliza esencial para la dieta de la población chilena.

Hipótesis

Si se exponen *Allium cepa* en un medio con nitrato de plomo diluido en agua, entonces su biomasa, longitud y perímetro se verán afectados, disminuyendo su variación de crecimiento en comparación a cebollas expuestas sólo a agua destilada.

Objetivo general

Comparar los efectos en el crecimiento de *Allium cepa* expuestos en un medio con nitrato de plomo en disolución acuosa con otros individuos de la misma especie expuestos solo a agua destilada.

Objetivo específicos

1. Exponer la zona suberificada de cebollas a nitrato de plomo en disolución acuosa.
2. Medir la variación de la biomasa y el tamaño longitudinal, en individuos de *Allium cepa* en la zona suberificada, el perímetro del bulbo y el tallo brotado en presencia y ausencia de nitrato de plomo en disolución acuosa.
3. Inferir los efectos que el plomo puede provocar sobre la productividad agrícola de la cebolla.

Metodología

Para cumplir con el objetivo general y específicos se usaron 30 individuos de *A. cepa* expuestos a diferentes concentraciones de nitrato de plomo en disolución acuosa. Estos fueron divididos en 3 tratamientos con distintas concentraciones de plomo (Pb^{2+}). El primer grupo (grupo control), fue expuesto solo a agua destilada sin presencia de plomo. El segundo grupo (Alta $[Pb]$) fue sometido a una alta concentración de plomo (Pb^{2+}), con una disolución de 33,12mg/L, esta fue preparada a base de nitrato de plomo sólido ($Pb(NO_3)_2$). Y por último, el tercer grupo (Baja $[Pb]$) fue sometido a una menor concentración de plomo (Pb^{2+}), con una disolución de 0,1mg/L (simulando las concentraciones encontradas en el agua potable y de regadío). Todas las cebollas se sometieron a estos diferentes tratamientos a partir del miércoles 17 de agosto del año 2022. Para medir los cambios en el desarrollo de *A. cepa* evaluamos la variación de su biomasa, perímetro del bulbo, diámetro de la zona suberificada y longitud del tallo. Con la ayuda de una huincha medimos la longitud del tallo, el perímetro del bulbo. La zona suberificada en la medición inicial se consideró como 0 cm porque las raíces estaban secas antes de colocarlas en los diferentes medios.

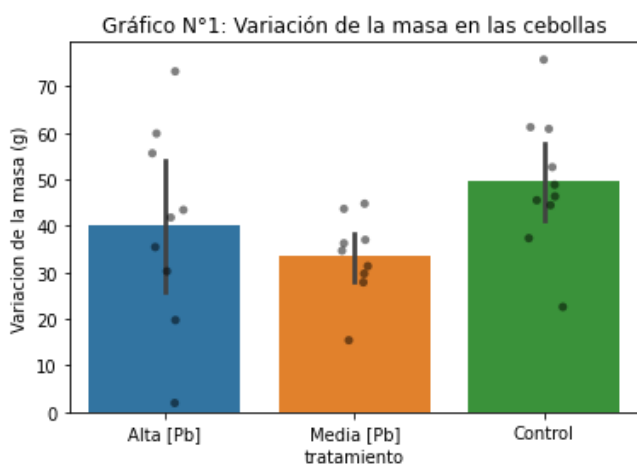
Una vez terminado el periodo de exposición de 8 semanas se realizaron las mediciones correspondientes para obtener la variación de crecimiento en los diferentes tratamientos de individuos de *A. cepa*.

El análisis de datos y el diseño de los gráficos se desarrolló en la plataforma Google Colab, programando con el lenguaje de programación Python usando las librerías Matplotlib, Pandas y Seaborn.

Resultados

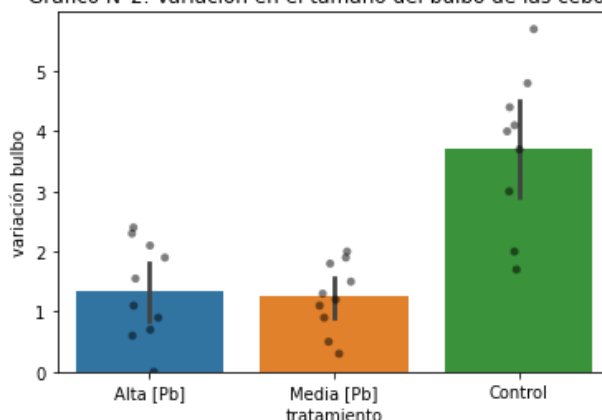
Se calculó la variación en el tamaño del bulbo, del tallo, de la raíz y de la biomasa. Para entender las diferencias que existieron entre los tratamientos, para esto se utilizó las librerías de Python como Seaborn y Pandas. Los gráficos que se diseñaron son gráficos de barras donde se compara el promedio obtenido entre los diferentes tratamientos que nos ilustra las tendencias que existen entre ellos y así entender las leves diferencias que tienen los cambios en el desarrollo que tuvieron las cebollas frente a diferentes concentraciones de plomo. A continuación, se analizará cada gráfico comparando cada variable estudiada.

Para la variación de la masa en las cebollas (Gráfico N°1), las réplicas que estaban con altas concentraciones de plomo tuvieron un menor crecimiento promedio (42.6 g), seguida con la concentración media de plomo con 35.5 g y seguida por la variable control con 47.6 g.



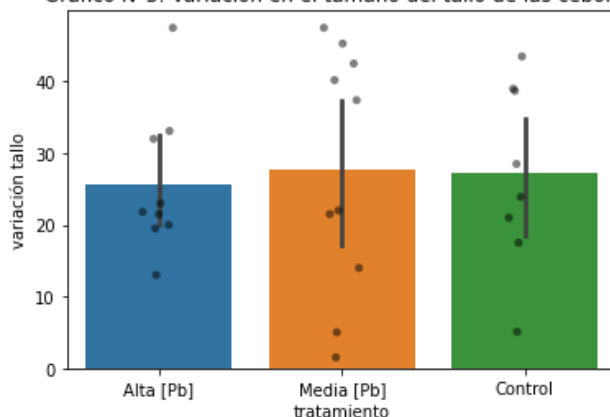
En el segundo análisis sobre la variación en el tamaño del bulbo de las cebollas (Gráfico N°2). Las cebollas con altas concentraciones de plomo presentaron un aumento en el crecimiento de 1.3 cm, bajo concentraciones medias de Pb el crecimiento fue de 1.2 cm, en cambio, en el caso del tratamiento en ausencia de plomo las cebollas crecieron con promedio de 4 cm, presentado una tendencia que las concentraciones de plomo tienen un efecto negativo sobre el tamaño del bulbo.

Gráfico N°2: Variación en el tamaño del bulbo de las cebollas



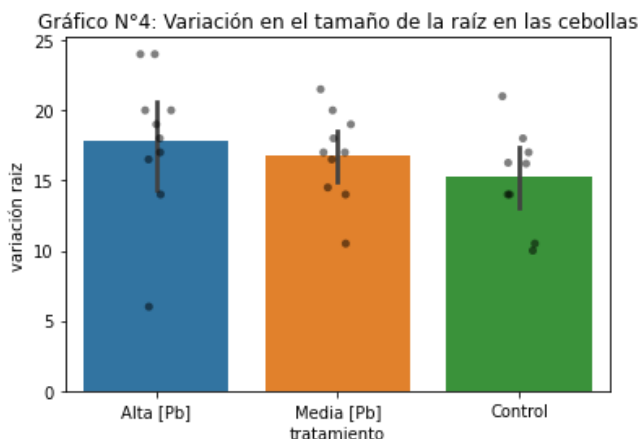
En el tercer análisis, tamaño del tallo de las cebollas (Gráfico N°3), se repite el mismo patrón que en los dos análisis anteriormente vistos. Las cebollas que estaban en altas concentraciones de plomo presentaron un aumento promedio de 22.4 cm aproximadamente, seguida por las cebollas expuestas a medias concentraciones con un promedio de 29.7 cm de crecimiento y las cebollas sin presencia de plomo tuvieron el mayor crecimiento del tallo con un 33.6 cm. Observando el gráfico se ve una tendencia similar en el tamaño del tallo en los tres tratamientos.

Gráfico N°3: Variación en el tamaño del tallo de las cebollas



Y por último, la variación en el tamaño de las raíces (Gráfico N°4), podemos ver que hubo un desarrollo directamente proporcional al grado de exposición del plomo. Las cebollas con altas concentraciones de plomo tuvieron un crecimiento más alto que el resto de los tratamientos, con un promedio de 18.5 cm; seguida por las cebollas expuestas a una concentración media con un promedio de crecimiento de 17.0 cm y las cebollas que presentaron un menor crecimiento de la raíz

fueron las que no tuvieron exposición al plomo, con un crecimiento promedio de 16.23 cm.



A partir del estudio comparativo entre las exposiciones que tuvieron las cebollas frente a diferentes concentraciones de plomo, se puede establecer que mientras mayor sea la concentración de plomo, el desarrollo de las cebollas se verá afectado en el tamaño del bulbo y de su biomasa.

Discusión

A partir de los resultados podemos evidenciar que la mayoría de los individuos de A. cepa expuestos a altas concentraciones de plomo (Alta [Pb²⁺]) y las hortalizas en concentraciones similares a la del agua potable (Media [Pb²⁺]), no crecieron adecuadamente al compararlas con el desarrollo del grupo control, lo cual implicó que se afectase tanto el tamaño del bulbo como su biomasa. Esto tiene una incidencia negativa en la productividad agrícola, porque se puede entregar una hortaliza de menor calidad, disminuyendo su oferta y aumentando su precio, haciéndola menos accesible a los estratos socioeconómicos más bajos. Además, en el tamaño del tallo no hubo grandes diferencias entre los tratamientos, estructura de la cebolla que no tiene importancia comercial. Sin embargo, hubo una relación directa en el caso del tamaño de la raíz, donde las cebollas expuestas a altas [Pb²⁺] tuvieron un mayor crecimiento en la zona suberificada, esto se puede deber porque el plomo al ser un factor mutagénico, acelera la división celular aumentando la proliferación celular, produciendo raíces más largas que en condiciones normales.

La totalidad de nuestros objetivos se cumplieron exitosamente, ya que logramos exponer las cebollas A. cepa a una disolución acuosa con plomo, se midieron todas las variables establecidas como, perímetro del bulbo, biomasa, longitud del tallo y tamaño de la zona

suberificada. Por último, gracias a los resultados obtenidos evidenciamos el efecto negativo que tiene el plomo presente en el agua potable sobre la productividad agrícola de las cebollas A. cepa e inferir los riesgos económicos que pueden tener en el desarrollo sostenible de esta hortaliza, porque este modelo procura el cuidado de la dimensión económica en un país que es miembro de la ONU como Chile.

Al observar los resultados a través de los gráficos nos cuestionamos qué tan factible sería aumentar la replicabilidad, esto quiere decir incrementar la cantidad de cebollas por tratamiento, ya que a medida que se agreguen cebollas la variación dentro de los tratamientos será menor y el resultado será más exacto. También nos surgió la iniciativa de conocer las concentraciones reales presentes en el agua potable por medio de procedimientos químicos y no guiarse por medio de los informes que presenta el Estado.

Conclusiones

Como conclusión, en nuestro trabajo logramos evidenciar los efectos del plomo en cebollas A. cepa para observar que las variables con importancia económica como el tamaño del bulbo y la biomasa tienen un efecto negativo al ser expuestas a plomo. En cambio, en el tamaño del tallo no se observaron grandes diferencias, lo cual no es de gran importancia, ya que la estructura no es relevante para su comercialización. Y por último, en el tamaño de las raíces sucede una situación inversa en donde las cebollas expuestas a altas concentraciones de plomo crecieron en mayor medida a diferencia de los otros tratamientos. Por lo tanto, inferimos que este contaminante puede provocar mutaciones sobre los oncogenes, genes reguladores que aceleran el ciclo celular. Esto sucede ya que el plomo al ser un factor mutagénico acelera la división celular, por ende la proliferación celular aumentando el tamaño de las raíces, observándose los resultados obtenidos.

Como proyección al trabajo de investigación es necesario conocer como otras sustancias tóxicas podrían influir en el desarrollo no solo de hortalizas, sino también en cultivos de especies nativas como la quinoa. También comparar como diferentes cultivos se ven podrían ver afectados a partir de agua potable proveniente desde diferentes partes de la Región Metropolitana.

Bibliografía

Carrizo, E, Osorio, D.(19 de agosto de 2022). Los precios de los principales productos de la canasta dieciochera anotan sus niveles más altos de los últimos años. La Tercera. Recuperado 28 de agosto del 2022. [<https://www.latercera.com/pulso/noticia/los-precios-de-los-principales-productos-de-la-canasta-dieciochera-anotan-sus-niveles-mas-altos-de-los-ultimos-anos/U7VJC7H7NJGRDKLJQVWYI3A4TI/>]

Granados, S., Quiles, J. L., Gil, A., & Ramírez-Tortosa, M. C. (2006). Lípidos de la dieta y cáncer. *Nutrición hospitalaria*, 21, 44-54.

Larraín S.(20 de marzo de 2016). Alto Maipo y la contaminación del agua que abastece Santiago. Cooperativa. Recuperado 28 de agosto del 2022.

Rey, A. R., Luna, L. C., Cantillo, G. M., & Espinosa, M. E. S. (2017). Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35(3), 251-271.

[<https://opinion.cooperativa.cl/opinion/medio-ambiente/alto-maipo-y-la-contaminacion-del-agua-que-abastece-santiago/2016-03-20/064424.html>]

Lerda, D. E. (1992). Estudio citogenético y bioquímico en personas expuestas al plomo (Doctoral dissertation, Universidad Católica de Córdoba).

Mantilla Villacís, R. G. (2018). Determinación de metales pesados y pérdidas poscosecha en dos hortalizas de consumo directo, pimiento (*Capsicum annuum*) y cebolla (*Allium cepa*) (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

Organización Mundial de las Naciones Unidas. (s.f.) Objetivo 2: Poner fin al hambre. Objetivos de desarrollo sostenible. Recuperado 28 de agosto del 2022. [<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>]

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en Salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.

Universidad de Emory. (s.f.). Genes del cáncer. CancerQuest. Recuperado 28 de agosto del 2022.

[<https://www.cancerquest.org/es/biologia-del-cancer/genes-de-cancer>]



USACH



Brotes Científicos

REVISTA DE INVESTIGACIONES ESCOLARES

Artículo de Investigación
Research Article

ISSN 0719-8558

Vol. 7

Pag. 46-58 (2025)

Ciencias Naturales

Ciencia ciudadana para estudiar la contaminación del aire de forma económica

*CITIZEN SCIENCE TO STUDY AIR
POLLUTION ECONOMICALLY*



Estudiantes

A.-V. Aitor
C.-R. Ana
G.-G. Paula
G.-S. Joel
K.-A. Anil
L.-V. Héctor
M.-G. Irene
P.-S. David
V.-S. Mónica

Profesor guía

Soledad Benlloch Navarro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5748-0082>

Colegio

Ámbito científico 4ºESO PDC, Instituto de Educación Secundaria
(IES) de Betxí, Castellón España



- Artículo Recibido: 27 de julio, 2025
- Artículo Aceptado: 18 de agosto, 2025
- Artículo Publicado: 10 de septiembre. 2025

El Proyecto participó

* Proyecto estatal Amiaire.org 2025

* Esta publicación está bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 4.0 España de Creative Common

Resumen

La contaminación del aire es cada vez más, un problema para nuestra salud, con complicaciones como asma, dificultad para respirar, tos o irritación en la garganta o incluso problemas en el corazón. El desarrollo industrial y la emisión de gases contaminantes por parte de los medios de transporte es actualmente la principal causa de contaminación del aire. Es por ello que, en el presente trabajo se ha estudiado la contaminación del aire del IES Betxí. Todo ello, enmarcado dentro del proyecto estatal de ciencia ciudadana Amiaire.org (Amiaire, 2025) en el que han participado más de 100 centros educativos de toda España. Mediante la utilización de unos sencillos sensores de papel con vaselina hemos podido obtener muestras del material particulado circulante en el ambiente. Asimismo, el IES Betxí también ha sido seleccionado para disponer de un sensor digital de medición de partículas en suspensión, lo que les ha permitido a los investigadores del proyecto contrastar la fiabilidad de los sensores de papel como sistemas para medir la calidad del aire. Con todo ello, la calidad del aire en nuestro centro ha sido en general buena, siguiendo con los estándares de calidad del aire marcados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), aunque ha existido una gran diferencia entre la calidad del aire exterior (buena) y las mediciones realizadas en nuestra aula de 4ºESO del Programa de Diversificación Curricular (4PDC), donde la calidad del aire ha sido moderada. Además, este proyecto ha sido clave para llevar a cabo todos los pasos del método científico estudiados en la asignatura de ámbito científico, ya que ha sido el alumnado de esta asignatura quien ha desarrollado todas las partes del mismo.

→ Palabras claves

Contaminación del aire, sensor, ciencia ciudadana, material particulado

Abstract

Air pollution is becoming a growing problem for our health, causing complications such as asthma, shortness of breath, coughing, or throat irritation, and even heart problems. The main causes of air pollution are currently industrial development and the emission of polluting gases from transportation. For this reason, this study has investigated the air pollution at IES Betxí. This was all part of the state-wide citizen science project Amiaire.org (Amiaire, 2025), in which more than 100 educational centers across Spain participated. Using simple paper sensors coated with petroleum jelly, we were able to collect samples of airborne particulate matter. Additionally, IES Betxí was chosen to receive a digital sensor for measuring suspended particles. This allowed the project's researchers to verify the reliability of the paper sensors as a method for measuring air quality. Overall, the air quality in our school has been generally good, in line with the standards set by the World Health Organization (WHO). However, there was a significant difference between the outdoor air quality (good) and the measurements taken in our 4th-year ESO classroom for the Curricular Diversification Program (4PDC), where the air quality was moderate. This project was also crucial for applying all the steps of the scientific method studied in the scientific field subject, as the students in this class were the ones who developed all parts of it.

→ Keywords

Air pollution, sensor, citizen science, particulate matter

Introducción

El aire es la sustancia que respiramos todo el tiempo. Está formado por una mezcla de sustancias. Aunque muchas veces parece limpio, en realidad, tiene pequeñas partículas y gases que no podemos ver.

Para saber si el aire que respiramos está limpio o sucio, se usan máquinas llamadas sensores especializados. Estas máquinas detectan sustancias en el aire y nos dicen cuánta cantidad hay de cada una («Píldora 1: Calidad del Aire», 2024). Sin embargo, en el presente trabajo, se han utilizado sensores de papel para detectar la contaminación ambiental por material particulado, además de un sensor digital donado por el proyecto en el que hemos participado y en el cual está enmarcada la presente investigación, proyecto denominado Amiaire.org.

Con la información recogida por los sensores podemos tomar decisiones para cuidar nuestra salud, como evitar lugares con mucho humo o contaminación. Esto es especialmente importante en las ciudades, donde hay muchos coches y fábricas que empeoran la calidad del aire. La calidad del aire se mide con estaciones de monitoreo on line que detectan contaminantes y calculan un índice para saber si el aire es limpio o sucio (Índice de Calidad del Aire, s. f.).

El aire contiene diversos tipos de sustancias sólidas y gases. Los principales gases atmosféricos son: Oxígeno (16%), Nitrógeno (78%), y trazas de otros gases tales como: óxidos de nitrógeno (NO_2), Ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), etc a nivel de trazas.

Otros gases que encontramos son los compuestos orgánicos volátiles, éstos provienen de productos como pinturas o productos de limpieza. Todos estos gases, a excepción del oxígeno, pueden causar problemas en la respiración y afectar la salud (World Health Organization: WHO, 2024).

El material particulado atmosférico contiene partículas, sólidas o líquidas, que flotan en el aire y que pueden ser perjudiciales para nuestra salud. Existen, mediciones y antecedentes de dos tipos de material particulado (PM) con efectos nocivos sobre la salud: PM10 y PM 2.5. («Píldora 2: ¿Qué Es el Material Particulado y de Dónde Viene?», 2025).

Material particulado 10 (PM10): son partículas de 10 μm de diámetro, más pequeñas que un pelo de persona. Aunque son pequeñas, a veces podemos verlas si hay muchas juntas, como en lugares con mucho polvo, humo o fábricas. Estas partículas han sido el objeto de estudio del presente trabajo. Estas partículas se suelen quedar en la nariz o la garganta, pero si respiramos muchas o durante mucho tiempo, pueden llegar hasta los pulmones y causar problemas de salud.

Material particulado 2.5 (PM2.5): son partículas de 2,5 μm de diámetro. Estas partículas son muy pequeñas. Son tan finas que no podemos verlas, pero pueden entrar muy profundo en nuestros pulmones e incluso llegar a la sangre. Por eso, estas partículas son las más peligrosas para nuestra salud.



Figura 1. Comparativa del tamaño de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} con un pelo humano y un grano de arena. Adaptada de Particulate Matter (PM) Basics | US EPA, 2025.

La mayoría de las partículas se forman en la atmósfera como resultado de reacciones complejas de químicos como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, que son contaminantes emitidos por plantas de energía, industrias y Automóviles (Particulate Matter (PM) Basics | US EPA, 2025).

Por todo ello, es importante reducir la cantidad de material particulado en el aire para cuidar nuestros pulmones y nuestra salud en general. Algunos de los problemas de salud causados por la contaminación del aire son: dificultad para respirar, tos o irritación en la garganta, problemas en el corazón, y empeoramiento de enfermedades como el asma.

Fuentes de contaminación del aire

Es importante conocer de dónde vienen estas partículas para encontrar formas de reducirlas y proteger la calidad del aire y nuestra salud («Píldora 2: ¿Qué Es el Material Particulado y de Dónde Viene?», 2025). En cuanto a los principales lugares de procedencia del material particulado encontramos:

Sitios naturales: Como el polvo de los volcanes, el humo de los incendios de los bosques que lleva partículas muy pequeñas que pueden viajar muy lejos y afectar lugares lejanos, o la calima, es decir, polvo que viene del desierto o la sal que viene del mar.

Actividades humanas: Como el humo que sale de los vehículos que usan combustibles fósiles (los coches, motos, autobuses y camiones expulsan la mayor parte de estas partículas en las ciudades), los vehículos que levantan polvo del suelo al circular por las distintas vías, aquellas fábricas que trabajan con materiales que sacan polvo o que queman productos o el polvo de las obras de construcción. Asimismo, son fuente de material particulado las chimeneas y la calefacción (cuando se quema madera o combustible en chimeneas o calderas, se crean partículas que salen al aire), así como la agricultura, al hacer agujeros en la tierra para plantaciones.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que el material particulado se moverá (trasladará) de manera distinta según las condiciones atmosféricas de los lugares, puesto que afectan a su circulación diferentes factores abióticos atmosféricos tales como: velocidad del viento, lluvias, temperatura, humedad y la estación del año en la que nos encontremos. El viento mueve o dispersa las partículas a otros sitios, expandiendo la contaminación. La lluvia limpia el aire, haciendo que las partículas caigan al suelo y mejorando temporalmente la calidad del aire, además la humedad junta las partículas y hace que caigan al suelo más rápido, reduciendo temporalmente la contaminación. La temperatura afecta el traslado vertical de las partículas que se mantienen en el aire. En climas fríos, las partículas están más cerca del suelo o donde se emiten, empeorando la calidad del aire. Y en cuanto a las estaciones del año, en invierno, la calidad del aire empeora por el uso de calefacción (se emiten más cantidad), mientras que, en verano, el clima seco ayuda a la suspensión del polvo y aumenta la contaminación («Píldora 4: ¿Movimiento de las partículas según el tiempo?», 2025).

Entonces es importante registrar cualquier alteración climatológica producida durante el registro de contaminación, así como las condiciones climatológicas de cada momento, pues todas ellas podrán afectar a los resultados.

Asimismo, es importante conocer también las principales fuentes de contaminación en interiores, ya que parte de nuestro trabajo está dedicado a comparar la contaminación interior con la exterior. Las principales fuentes de contaminación en interiores que podemos encontrar son (Acerca de los Contaminantes del Aire En Interiores y Sus Fuentes | US EPA, 2024);

1. Quemar combustibles en hogares: El uso de estufas, chimeneas o calentadores que queman madera, carbón, gas o queroseno puede liberar partículas y gases nocivos en el interior.

2. Humo de tabaco: Fumar en interiores genera partículas finas y compuestos tóxicos que contaminan el aire, afectando también la salud de los no fumadores.

3. Productos de limpieza y aerosoles: Muchos productos contienen sustancias químicas que, al pulverizarlos o usarlos, liberan partículas y vapores en el ambiente cerrado.

4. Vapores y humos de cocinas: La cocción, especialmente con aceites y grasas, genera humos y partículas que pueden quedar en el aire interior.

5. Moho y hongos: La humedad excesiva favorece su crecimiento, liberando esporas y partículas en el aire, que pueden causar problemas respiratorios.

6. Materiales de construcción y mobiliario: Algunos muebles, alfombras y pinturas contienen compuestos químicos o liberan partículas que afectan la calidad del aire interior.

7. Polvo doméstico: Se acumula en superficies y puede contener contaminantes como ácaros, partículas de carbón, polen, y otros alérgenos.

Material y métodos

Objetivos e hipótesis

Como objetivos de este trabajo nos planteamos estimar la calidad del aire del IES Betxí (buena, regular, mala) y evaluar la importancia de la ubicación espacial. Para tratar de dar respuesta a dicho planteamiento elaboramos dos hipótesis:

- **Hipótesis 1.** En las zonas de patio abierto y superior, donde circula más el aire, la calidad del aire por PM es mejor que en el patio inferior y en la zona del parking.
- **Hipótesis 2.** La calidad del aire en exteriores será mejor que en interiores.

Trabajo de Campo

Para llevar a cabo la determinación de la calidad del aire se emplearon dos tipos de sensores; uno de papel, pasivo y uno digital. Los sensores de papel tienen una zona con forma de cuadrado (figura 2), en dicha zona se pone vaselina neutra para que todas las partículas circulantes se puedan pegar en ella. Posteriormente, pegamos con cinta adhesiva los sensores en distintas zonas del instituto (figura 4). Respecto al sensor digital, este fue donado por donado por el proyecto Amiaire.org y este se colocó en la zona del patio superior, rodeado por 4 sensores de papel (figura 2).

El objetivo de utilizar el sensor digital era doble, por una parte, registrar los niveles de contaminación en la zona más al sur dentro del recinto del instituto y por otra, comprobar si los datos obtenidos a partir del sensor de papel eran similares a los obtenidos por el sensor digital. De esta manera, los investigadores del proyecto pretenden averiguar si los sensores de papel



Figura 2. Sensores de papel pegados junto al sensor digital (protegido por una carcasa) y detalle del sensor con material adherido.

son un método fiable para medir la calidad del aire.

Ubicación de los sensores:

Se estudiaron diferentes zonas del instituto, en exteriores: patio inferior, patio superior y en el pequeño parking del que disponemos (figura 3). Y en interiores, se analizó la contaminación en nuestra clase de 4t ESO de PDC.

El experimento duró 7 días y se llevó a cabo en dos tandas de experimentos, tanto en interior como en exterior. Esto nos permitió ampliar el tamaño muestral y tener información en meses distintos, dado que la climatología está íntimamente relacionada con la calidad del aire. Concretamente, la primera campaña en exterior fue al inicio de la primavera, del 25 de marzo al 1 de abril. Debido a que nos encontrábamos a inicio de la primavera, el aire empezaba a ir cargado de polen. Además, llovió una tarde. Mientras que la segunda campaña en exteriores fue del 6 al 13 de mayo, ya bien adentrados en primavera, donde los árboles estaban cargados de insectos y polen. Además, en la segunda campaña llovió dos días, con momentos de lluvia intensa. Respecto al número de sensores colocados en exteriores, como se puede ver detallado en la tabla de la figura 3, fueron un total de 42 sensores en la primera campaña y 43 en la segunda. Cabe advertir que, tanto el personal docente, limpieza y alumnado, respetaron en todo momento la localización de los sensores y no los manipularon, pero, aun así, algún sensor de exterior en algún caso debió de ser eliminado ya que, debido a la humedad, lluvia o problemas al retirarlos, las muestras quedaron inutilizadas.

En relación con el experimento de los sensores en el aula, la recogida de muestras tuvo lugar también en dos tandas: la primera del 2 al 9 de abril y la segunda del 19 al 26 de mayo, en las mediciones realizadas en el aula se colocaron un total de 12 sensores (6 en cada campaña de medición).

A)

		CAMPAÑA 1		CAMPAÑA 2	
		Nº MUESTRAS	ELIMINADAS	Nº MUESTRAS	ELIMINADAS
Patio de arriba	Árboles B.	3	1	4	1
	Red	3	0	3	0
	Pinos	3	0	3	1
	Farolas	3	0	3	0
	Zona ciprés	3	0	3	0
	Árboles V.	3	0	3	0
Pati de abajo	Columnas	6	1	6	0
	Pared	6	1	6	0
Párquing		6	0	6	0
Clase		6	0	6	0
TOTAL		42	3	43	2
TOTAL MUESTRAS VÁLIDAS		80			

B)



Figura 3. Tabla de las zonas y número de muestras (A) y plano del IES Betxi con las chinchetas de los puntos de muestreo (B).



Figura 4. Alumnado participante en el proyecto colocando los sensores.

Procesamiento de muestras y cuantificación

Procesamiento de los sensores: después de 7 días, éstos se retiraron y posteriormente, tomamos las fotos al sensor con un mismo dispositivo móvil. Es muy importante para no falsear los resultados que las fotos estén echas sin zoom, siempre con el mismo encuadre y desde cerca, además en la foto no deben apreciarse brillos ni salir cortada la cuadrícula de ensayo.

Para la cuantificación del material particulado, se empleó la herramienta de la web del proyecto Amiaire.org. (figura 5). En dicha página web hay un software en el que, tras introducir las fechas del experimento y su ubicación con coordenadas exactas, te permite poder analizar la calidad del aire. Para ello, se sube cada una de las fotos, una a una, y se cuantifican también una a una. El programa convierte las imágenes a binarias (blanco y negro) donde aparecen las partículas pegadas en color blanco. Conociendo el programa la superficie del

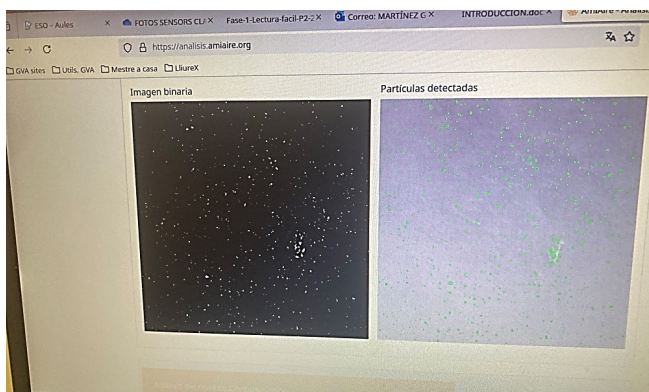


Figura 5. Muestra de la cuantificación de uno de los sensores, en la imagen de la izquierda el software “binariza” la imagen. En la foto de la derecha, a partir de la imagen binaria se cuantifican las partículas en verde.

cuadrado, este te cuantifica para cada sensor los $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado del tipo PM10 que se han adherido al sensor.

Finalmente, el análisis de datos cuantificados lo realizamos mediante una hoja de cálculo Excel. Con dicha hoja se obtuvieron y compararon los estadísticos descriptivos de la media y la desviación estándar.



Figura 6. Alumnado de 4ESO PDC analizando muestras, realizando registro de los datos y comenzando a escribir el artículo científico.

Resultados

La figura 7 muestra los resultados obtenidos al variar la zona de muestreo.

Se observa que el experimento 1, los niveles de PM10 han sido más altos que en el experimento 2. En distintas zonas del experimento 1, los niveles de PM10 han sido claramente superiores, que en el experimento 2, especialmente en zona árboles B, pinos y zona ciprés (patio superior) y en el parking. Asimismo, también podemos observar que en el experimento 2, la zona ciprés y pinos es la más contaminada.

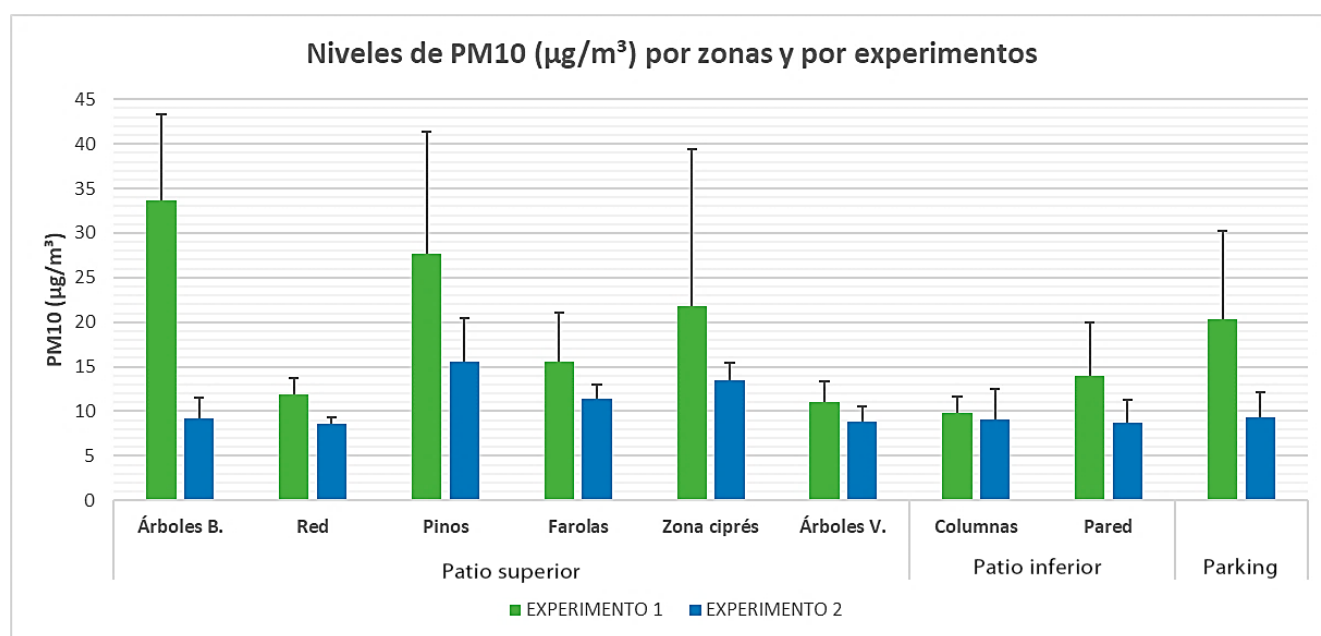


Figura 7. Comparativa de los resultados de las dos campañas de medición por zonas.

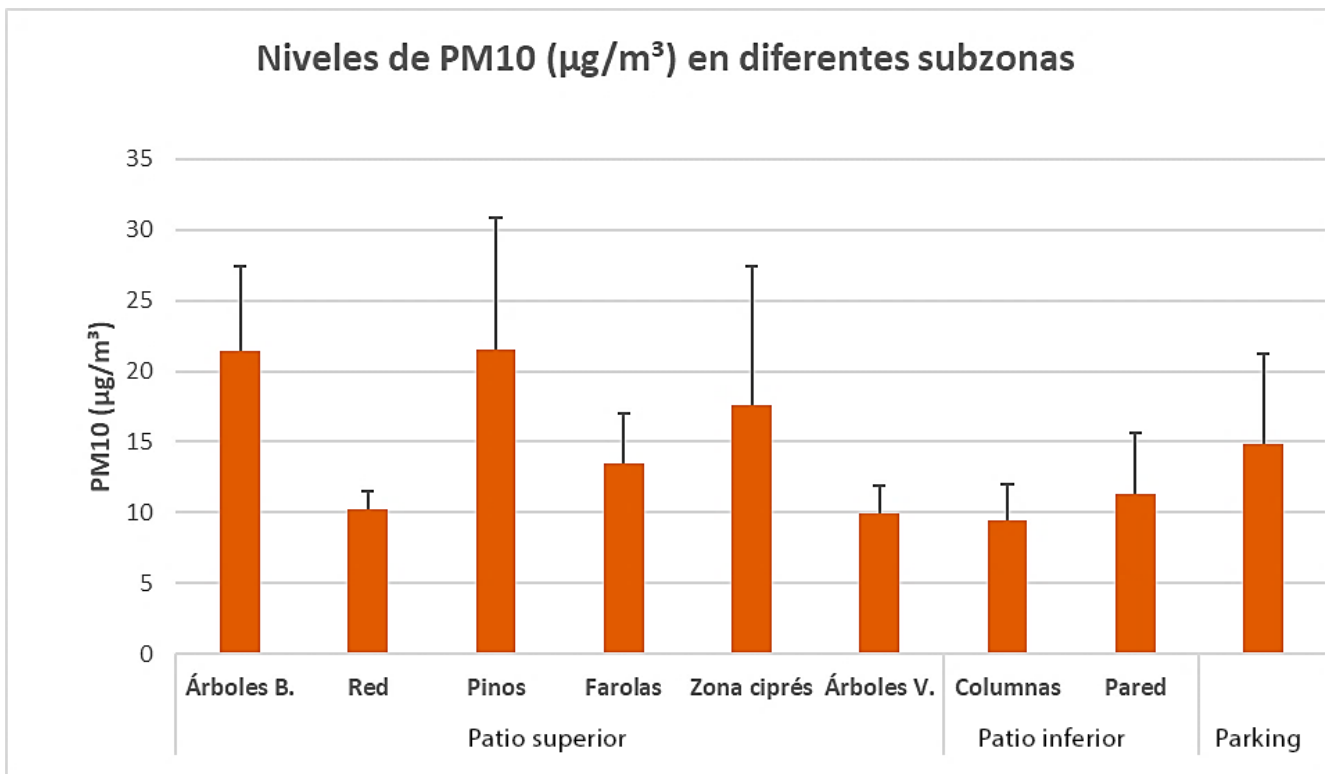


Figura 8. Cuantificaciones realizadas al agrupar los dos experimentos y analizar los datos por zonas conjuntamente.

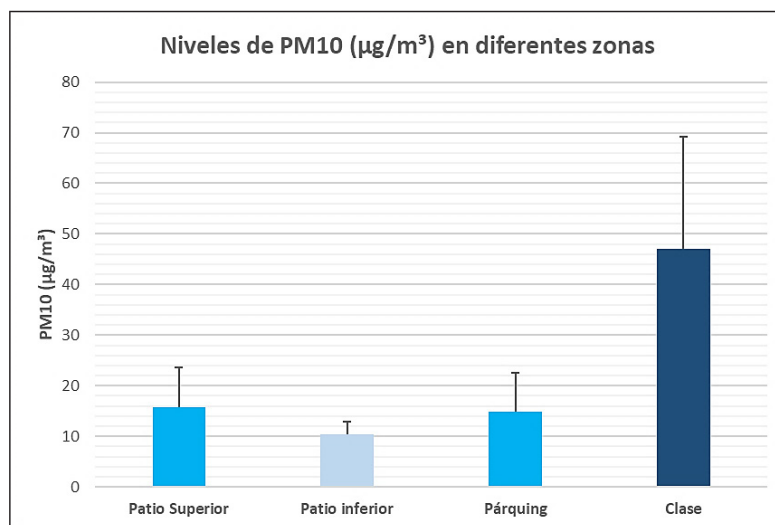


Figura 9. Análisis de los resultados de los dos experimentos según las zonas de patio superior, inferior, parking y clase.

En la figura 8 se muestran los resultados de los niveles de PM10(µg/m³) de los dos experimentos según las zonas del exterior del IES Betxí ensayadas. Podemos observar que el patio de arriba tiene más contaminación que las diferentes zonas del recinto escolar, registrando valores más elevados en todas las zonas de árboles, seguidos por los valores obtenidos en el parking.

Podemos observar que el nivel de PM10 (µg/m³) de clase está mucho más alto que en los otros lugares llegando hasta un máximo de 70 en algunos casos. Estos niveles corresponden según la escala de la OMS a un nivel de posible daño moderado para la salud. Mientras que en el patio superior y parking hay más PM10 que en el inferior. La calidad de aire en el patio inferior es muy buena y en el superior es buena (en la

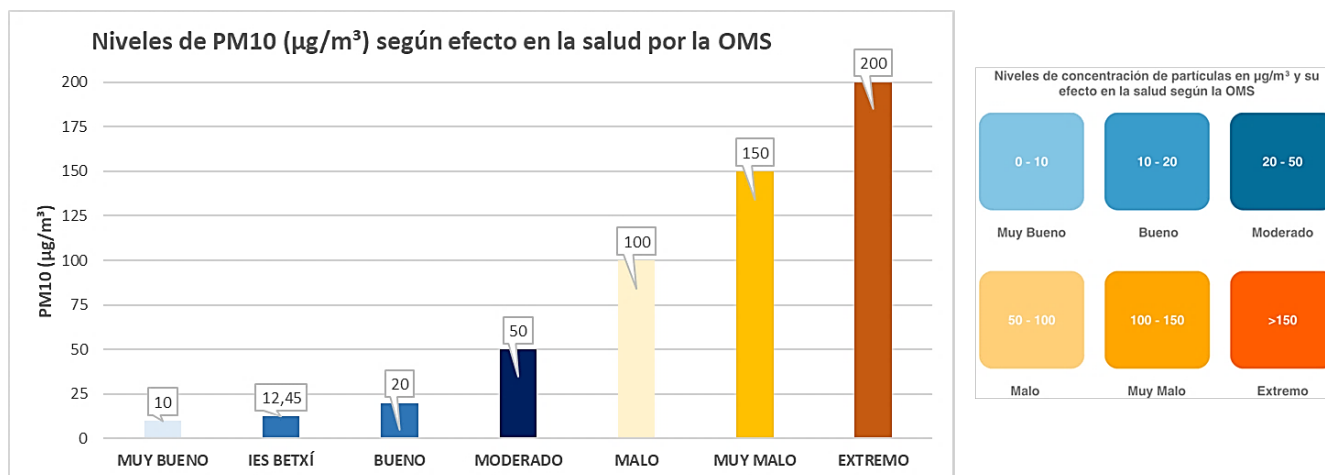


figura 10 se han seguido los códigos de colores de la figura 10 establecidos por la OMS según el daño a la salud).

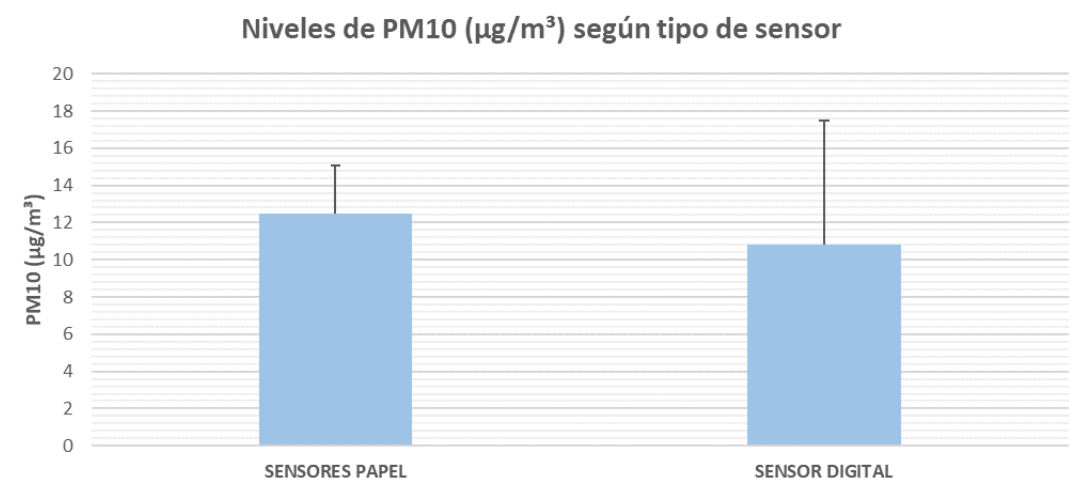


Figura 11. Comparativa de los resultados obtenidos en los sensores de papel versus el sensor digital.

En la figura 10 comparamos los resultados de los intervalos de contaminación con el daño que nos puede causar a nuestra salud. Los niveles de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) que se han obtenido en el IES Betxí en exteriores (media de todos los datos en exterior y de las dos campañas) se encuentran en un punto intermedio entre muy bueno y bueno, con una media de PM10 de 12,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Finalmente podemos observar en la figura 11 que la media de los resultados de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtenidos en exterior por el sensor de papel y el sensor digital muestran una diferencia mínima. Sin embargo, el sensor de papel tiene una media un poco más alta (12,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 2,59$), pero el sensor digital tiene una desviación estándar superior (10,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 6,62$), destacando que en ambos casos la calidad del aire registrada ha sido buena.

Discusión y conclusiones

Diferencias entre campañas de medición

Al analizar las diferentes circunstancias que afectaron a las dos campañas de medición en exteriores (1ª del 25 marzo al 1 abril y la 2ª del 6 de mayo al 13 de mayo), se deduce que, en el primer experimento parece ser que ha habido más contaminación (figura 7), creemos que los resultados se explican porque la semana del primer experimento no llovió a penas y en la segunda campaña de medición sí que llovió dos días de manera intensa. Y es que, está demostrado que la dispersión atmosférica de los contaminantes depende de las condiciones meteorológicas y de los parámetros y condiciones en que se produce la emisión del contaminante en la fuente (Dispersión | Calidad del Aire Aragón, s. f.). Las altas presiones “buen tiempo” supo-

nen ausencia de movimientos verticales en la atmósfera y también de viento y precipitaciones. Dichas condiciones no facilitan la dispersión ni la deposición de los contaminantes y por tanto la calidad del aire empeora.

Concretamente, el material particulado se dispersa mediante: viento, lluvia, temperatura, humedad. La lluvia limpia el aire, haciendo que las partículas se depositen al suelo, mejorando temporalmente la calidad del aire. La humedad coagula a las partículas y hace que aumente su masa, por lo que hace que se depositen en el suelo reduciendo temporalmente la contaminación. La diferencia entre los experimentos, debido al efecto de la lluvia y la remoción húmeda, explica los bajos niveles de contaminación obtenidos en la segunda campaña de medición.

Análisis por zonas en exteriores

Haciendo la media de los datos por zonas en exteriores de los dos experimentos (figura 8), las zonas con más material particulado fueron las zonas con presencia de árboles. Seguramente esto sea por la caída de polen y sobre todo por restos de la corteza de los árboles, resina y/o restos biológicos de los insectos que se encontraban por los árboles y que se adherían al sensor, o bien por la presencia de moléculas orgánicas que crean núcleos de condensación del material particulado atmosférico. Estos resultados nos han hecho repensar el experimento y concluir que, si repitiésemos el experimento en nuestro instituto o como recomendación para posteriores experimentos, no sería recomendable poner los sensores de papel en zonas con restos biológicos como los árboles, ya que existen algunos factores en ellos que podrían falsear los resultados.

En segundo lugar, en cuanto a la zona más contaminada en exteriores se encuentra la zona del parking, cuya presencia de material particulado se explicaría por la circulación continua de los coches del personal del centro.

Análisis de contaminación exteriores e interior

Entre los espacios analizados donde hemos colocado sensores tanto en exterior como en interior, el espacio más contaminado ha resultado ser como era de esperar, nuestra aula. Esto se explica por los restos de tiza que pueden encontrarse en el ambiente, a parte de la circulación de personas que entran y salen a lo largo del día. Asimismo, es importante destacar que, el sistema de ventilación actual de las aulas no permite abrir las ventanas del todo. Se trata de ventanas superiores parcialmente abatibles con lamas que impiden que

circule aire a través de todo el espacio de la ventana y que, por tanto, se pueda renovar completamente. La contaminación del aire es especialmente importante en espacios cerrados y mal ventilados, donde la acumulación de partículas y gases puede representar un riesgo para la salud, especialmente para niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias. En este sentido, en nuestro centro está prevista la realización de obras destinadas a la sustitución de las ventanas de las aulas y sistemas de ventilación por otros que permitan una mayor renovación del aire interior, lo cual permitirá mejorar la salud de todo el personal, especialmente de las personas más vulnerables con alergias y problemas respiratorios.

Por lo que respecta a las diferencias fijándonos solo en exteriores, las zonas con más PM10 han sido el parking y el patio superior, posiblemente por las razones expuestas anteriormente para ambos casos.

Nivel general de PM10 en el IES Betxí

Al analizar los datos obtenidos de la media de PM10 en todo el exterior de nuestro instituto se observa que, los niveles de PM10 son de $12,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta cifra corresponde con un nivel de calidad del aire para con la salud de entre “muy bueno” y “bueno”, según los intervalos de contaminación establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Esto denota que la zona donde se encuentra el IES Betxí presenta una buena calidad del aire, a pesar de que, el centro se halla situado en una zona de polígono industrial, pero que por lo que parece, “AL NO EXISTIR GRANDES EMISIONES POR CHIMENEAS”, no afecta a la calidad del aire de la zona.

Fiabilidad de los sensores de papel

Los investigadores del proyecto Amiaire.org nos dieron un sensor digital a 30 centros de toda España, con la finalidad de comprobar si los datos de los niveles de PM10 obtenidos a través de los sensores digitales, eran similares a los obtenidos en los sensores de papel pegados a su alrededor. Los resultados han sido esperanzadores dado que, como se puede observar en la figura 11, la diferencia entre ambos tipos de sensor ha sido muy pequeña con una media de PM10 de $12,45 \pm 2,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los sensores de papel, y una media de $10,84 \pm 6,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el sensor digital. Es más, los resultados de los sensores de papel parece que son menos variables (con una desviación estándar superior en el caso de los datos del sensor digital).

Calidad del aire y ciencia ciudadana

Es importante destacar que, resulta necesaria una sustancial mejora de la información sobre la calidad del aire que respiramos, en particular en el entorno de los centros educativos y otros centros sensibles, complementando la información proporcionada por las estaciones oficiales de medición con mapas de distribución y con campañas de medición.

Unir contaminación del aire y ciencia ciudadana nos permite que el alumnado se forme de manera práctica, conozca mejor la realidad de la contaminación del aire en su entorno, y si es necesario, que exija a las administraciones públicas que cumplan con su responsabilidad de medir e informar adecuadamente a la ciudadanía sobre la calidad del aire en cada momento. Es necesario promover sistemas de movilidad activa, sostenible, segura y saludable como el tránsito peatonal, la bicicleta y el transporte público que restrinjan el tráfico motorizado urbano con el fin de disminuir la contaminación que se deriva del mismo.

Calidad del aire en entornos educativos

De manera particular, para lograr entornos educativos saludables deberían implementarse medidas dirigidas a reducir la contaminación en las vías perimetrales a los centros escolares: priorizar el transporte público, compartido, en bicicleta y peatonal, limitar el aparcamiento y el tráfico en las calles del entorno y mejorar las entradas y salidas de los centros educativos para evitar las aglomeraciones de vehículos, así como hacer cumplir la normativa vigente penalizando la doble fila a la puerta de los colegios («Calidad del Aire En los Entornos Educativos», 2024). En este sentido, cabe destacar que es clave seguir las recomendaciones emitidas en la Guía para la calidad global del aire de la OMS (Air Quality, Energy and Health (AQE), 2021), en ella, entre otras cosas se exponen las diferentes cantidades de material particulado recomendadas para la salud y una serie de buenas prácticas para evitar que las sustancias contaminantes, especialmente el material particulado, puedan afectar a nuestra salud.

Aunque parece ser que a la luz de los buenos resultados que hemos obtenido podemos pensar que, las medidas citadas para mejorar la calidad del aire no sean necesarias en el entorno de nuestro centro, esto no es así, dado que dichas medidas a parte de mejorar la calidad del aire también van encaminadas a mejorar la seguridad vial en los centros.

Con todo ello, estamos muy orgullosos del trabajo llevado a cabo para que este proyecto haya podido culminarse con éxito, enmarcado en una materia, la del Ámbito Científico de 4º de ESO del Programa de Diversificación Curricular (4PDC) en la que, el alumnado ha llevado a cabo de primera mano todas las etapas del método científico estudiado a lo largo del curso. Con la escritura de este artículo se culmina con todas las etapas del método científico, la de difusión y publicación de resultados. Además, esto ha permitido poner en acción los conocimientos teóricos aprendidos en el aula, mediante una situación de aprendizaje con una aplicación real.

Este trabajo ha formado parte del proyecto Amiaire.org coordinado y llevado a cabo por la Universidad de DEUSTO, junto con la Fundación Ibercivis y Scicling. Para finalizar es importante destacar que, en este proyecto, participantes de más de 100 centros escolares a nivel estatal hemos utilizado metodologías de ciencia ciudadana para monitorizar la calidad del aire de nuestro entorno educativo, buscando la sensibilización del alumnado sobre la importancia de conseguir una buena calidad del aire que respiramos.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a la Universidad de DEUSTO, junto con la Fundación Ibercivis y Scicling por permitirnos formar parte del “proyecto Amiaire.org 2025”. Y, en segundo lugar, agradecemos a toda la comunidad educativa y personal del centro del IES Betxí por permitirnos llevar a cabo el proyecto sin ningún tipo de incidente, facilitándonos el colocar los sensores en las diferentes áreas y respetando los sensores colocados durante las campañas de medición.

Bibliografía

- Acerca de los contaminantes del aire en interiores y sus fuentes | US EPA. (2024, 2 octubre). US EPA. <https://espanol.epa.gov/cai/acerca-de-los-contaminantes-del-aire-en-interiores-y-sus-fuentes>
- Air Quality, Energy and Health (AQE). (2021, 22 septiembre). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Amiaire. (2025, 16 enero). Home - Amiaire. Amiaire - Ciencia Ciudadana En el Aula Para Medir la Calidad del Aire. <https://amiaire.org/>
- Calidad del aire en los entornos educativos. (2024). Ecologistas En acción.org. <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2024/05/calidad-aire-entornos-educativos-2024.pdf>
- Dispersión | Calidad del aire aragón. (s. f.). <https://aragonaire.aragon.es/es/dispersion>
- Índice de calidad del aire. (s. f.). Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/visualizacion-datos-calidad-del-aire/ica.html>
- Particulate Matter (PM) Basics | US EPA. (2025, 30 mayo). US EPA. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- Píldora 1: Calidad del Aire. (2024). Amiaire.org. <https://amiaire.org/wp-content/uploads/2025/02/Fase-1-Lectura-facil-P1.pdf>
- Píldora 2: ¿Qué es el material particulado y de dónde viene? (2025). Amiaire.org. <https://amiaire.org/wp-content/uploads/2025/02/Fase-1-Lectura-facil-P2.pdf>
- Píldora 4: Movimiento de las partículas según el tiempo (2025). Amiaire.org. <https://amiaire.org/wp-content/uploads/2025/02/Fase-1-Lectura-facil-P4.pdf>
- World Health Organization: WHO. (2024, 24 octubre). Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

IMPACTO DEL TURISMO DE FAUNA MARINA EN LA DIETA Y CONDUCTA DE ZORROS (*LYCALOPEX SPP.*), REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE

*IMPACT OF MARINE WILDLIFE TOURISM ON THE
DIET AND BEHAVIOUR OF FOXES (*LYCALOPEX
SPP.*), COQUIMBO REGION, CHILE.*

**Estudiantes**

Orlando Andrés
Silva Martínez

Curso

IV° B

Profesor guía

Melanie Duclos-Katunaric,
directora Fauna ID SpA, Virgino Arias 1400, Of. 306, Ñuñoa,
7800025, Chile. contactofaunaid@gmail.com
ORCID:0009-0002-5254-0997

Nombre e Institución de Investigador Asesor

Carlos N.F. Zurita Redón, director Centro de Investigación
Científica Escolar CICE, Pontificia Universidad Católica de Chile,
Casilla 114-D, Santiago, Chile.
ORCID: 0000-0003-4048-5527

Colegio

Colegio Saint Dominic, Viña del Mar, Región de Valparaíso.



- Artículo Recibido: 27 de julio, 2025
- Artículo Aceptado: 18 de agosto, 2025
- Artículo Publicado: 7 de noviembre, 2025

**Participación en Actividades Científicas
y/o Premio**

- * Semana de la Ciencia 2023, Saint Dominic School, Viña del Mar.

- * Esta publicación está bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 4.0 España de Creative Commons

Resumen

El aumento del turismo en áreas naturales puede alterar las conductas alimentarias y comportamentales de la fauna silvestre, afectando su salud y supervivencia. Se planteó la hipótesis de que la alta afluencia turística en la Ruta D-110-C (Región de Coquimbo, Chile) modifica la dieta y el comportamiento de los zorros presentes en la zona. Para evaluarlo, en septiembre de 2023 se recolectaron 96 heces y se documentaron 17 encuentros etológicos, enfocándose en la composición dietaria y la distancia de huida (FID) ante presencia humana. Los resultados revelaron una composición dietaria dominada por invertebrados (84,4 %), material vegetal –restos herbáceos (84,4 %) y semillas (65,6 %) – y micromamíferos – pelos (78,1 %) y restos óseos (32,3 %). Se hallaron residuos antropogénicos en el 31,3 % de las heces, principalmente goma de mascar y fragmentos plásticos. Por otra parte, el 76,5 % de los encuentros correspondió a acercamientos voluntarios hacia el observador, con una FID promedio de 3,6 m. Estos hallazgos sugieren que el turismo influye tanto en la dieta como en la tolerancia al disturbio humano. Se recomienda promover entornos naturales limpios y respetuosos, realizar monitoreos continuos de dieta y comportamiento, e incorporar análisis de biomarcadores de salud y toxicidad en poblaciones silvestres.

→ Palabras claves

*Análisis de heces; distancia de huida; *Lycalopex spp.*; residuos antropogénicos; tolerancia al disturbio.*

Abstract

The increase in tourism within natural areas can alter the feeding and behavioral patterns of wildlife, potentially affecting their health and survival. We hypothesized that high tourist influx along Route D-110-C (Coquimbo Region, Chile) modifies both the diet and behavior of local fox populations. To evaluate this, 96 scat samples were collected, and 17 behavioral encounters were recorded in September 2023, focusing on dietary composition and “flight initiation distance” (FID) in response to human presence. Results revealed a diet composition dominated by invertebrates (84.4%), plant material—herbaceous remains (84.4%) and seeds (65.6%)—and small mammals—hair (78.1%) and bone fragments (32.3%). Anthropogenic waste was found in 31.3% of the scat samples, mainly chewing gum and plastic fragments. Notably, 76.5% of the encounters involved voluntary approaches towards the observer, with a mean FID of 3.6 meters. These findings suggest that tourism influences both dietary intake and tolerance to human disturbance. We recommend promoting clean and respectful environments in natural areas, implementing ongoing monitoring of diet and behavior, and, where possible, incorporating biomarker analyses for health and toxicity in wild fox populations.

→ Keywords

*Fecal analysis; anthropogenic waste; flight initiation distance; disturbance tolerance; *Lycalopex spp.**

Introducción

El auge del turismo de intereses especiales en áreas naturales ha crecido sostenidamente en las últimas décadas, consolidándose como una de las ramas de mayor expansión dentro del turismo mundial (Higham y Lück, 2002; Newsome et al., 2013). Actividades como la observación de aves, safaris fotográficos o el avistamiento de cetáceos han generado beneficios económicos directos e indirectos en países como Sudáfrica, Costa Rica, Islandia y la Antártica, contribuyendo al desarrollo local y la valoración del patrimonio natural (Curtin, 2009). Sin embargo, este tipo de turismo también ha provocado alteraciones crecientes en los ambientes visitados, modificando dinámicas tróficas locales, afectando la conducta animal e impactando la biodiversidad (Buckley, 2011; Newsome et al., 2013).

En Chile, el turismo de intereses especiales ha experimentado un crecimiento sostenido, con destinos icónicos como San Pedro de Atacama, Torres del Paine y Chiloé atrayendo a miles de visitantes cada año (Espínosa et al., 2014). Este fenómeno ha incentivado el desarrollo de infraestructura y servicios, pero también ha generado preocupaciones respecto a la conservación de la biodiversidad y el impacto acumulativo en ecosistemas frágiles (Plaza y Lambertucci, 2018; Pavez et al., 2019; Newsome, 2020; Moreira-Arce et al., 2025). En particular, la Reserva Nacional Pingüino de Humboldt (RNPH) ubicada entre las islas Chañaral (Región de Atacama) y Damas (Región de Coquimbo), se ha consolidado como uno de los principales polos turísticos de fauna marina en el Norte Chico chileno. Su flora y fauna están sujetas a un plan de conservación que regula el acceso, el desembarco y las actividades permitidas, con el fin de proteger especies sensibles

y zonas de nidificación (CONAF, s.f.). La alta concentración de especies emblemáticas como el pingüino de Humboldt (*Spheniscus humboldti*), el lobo marino de un pelo (*Otaria flavescens*), el delfín nariz de botella (*Tursiops truncatus*) y diversas aves marinas, además de la aparición estacional de cetáceos como ballenas y cachalotes (*Physeter macrocephalus*), ha convertido a este conjunto insular en un destino de alta concurrencia, cuya valorización paisajística y ecológica sustenta estrategias de manejo orientadas a promover un turismo responsable (Cortés, 2024).

La RNPH recibe entre 20.000 y 60.000 visitantes por año concentrados principalmente en los meses de verano (enero-marzo) (SERNATUR, 2025). Esta afluencia turística, genera impactos ecológicos en zonas adyacentes no protegidas, por actividades como el tránsito humano y el manejo inadecuado de residuos (Buckley, 2011; Newsome et al., 2013; Plaza y Lambertucci, 2018).

Los sitios de disposición de residuos funcionan como subsidios alimentarios antropogénicos, ofreciendo recursos predecibles, de bajo costo energético para su obtención, pero de baja calidad nutricional y alto riesgo sanitario (Plaza y Lambertucci, 2018). Su presencia modifica la conducta alimentaria de especies generalistas, aumenta la probabilidad de ingesta de plásticos y desechos, y expone a la fauna a contaminantes, patógenos y elementos tóxicos con consecuencias negativas como: obstrucciones y rupturas del tracto digestivo, alteraciones nutricionales y desnutrición, alteraciones hormonales por consumo de contaminantes y elementos tóxicos que pueden comprometer su

salud y supervivencia (Derraik, 2002; Kühn et al., 2015; Pavez et al., 2019; Carrasco et al., 2020; Technau et al., 2022; Duclos-Katunaric et al., preprint). Además, la disponibilidad continua y predecible de estos recursos puede incrementar los encuentros entre fauna silvestre y animales domésticos, facilitando la transmisión de enfermedades infecciosas con consecuencias severas para la salud humana y animal (Moreira et al., 2005; Carrasco et al., 2020; Marín, 2023; Colegio Médico Veterinario de Chile, 2023). En Chile se han registrado brotes de distemper en zorros silvestres (Moreira et al., 2005), parvovirus en contextos urbanos (Marín, 2023) y un caso de rabia humana transmitida por perros callejeros (Colegio Médico Veterinario de Chile, 2023).

Estudios en zorros árticos (*Vulpes lagopus*) han mostrado que la ingestión de plásticos y desechos, habitual en paisajes antropizados, puede generar obstrucciones intestinales, abrasión de tejidos digestivos y exposición a compuestos tóxicos liberados por los plásticos o a contaminantes ambientales adsorbidos en su superficie (Derraik, 2002; Technau et al., 2022). En Chile, se ha documentado esta conducta alimentaria en el Parque Nacional Torres del Paine (PNTP) y en el Parque Nacional Río Clarillo (PNRC), donde zorros del género *Lycalopex* consumen desechos en sectores turísticos (Carrasco et al., 2019; Carrasco et al., 2020).

En la RNPH, la fauna susceptible al consumo de residuos en las zonas aledañas a la actividad turística incluye aves carroñeras facultativas (e.g., *Geranoaetus melanoleucus*, *Milvago chimango* y *Caracara plancus*), felinos (*Puma concolor*, *Leopardus colocolo*), mustélidos (*Coonipatus chinga*, *Galictis cuja*), y especialmente cánidos domésticos y silvestres (*Lycalopex griseus* y *Lycalopex culpaeus*). Estos últimos presentan hábitos generalistas y alta plasticidad ecológica, lo que les permite adaptarse a ambientes intervenidos y aprovechar recursos de diversa procedencia (IUCN, 2004; Carrasco et al., 2020). Los zorros culpeo (*L. culpaeus*) y chilla (*L. griseus*) se distribuyen ampliamente en Chile, desde Tarapacá hasta Tierra del Fuego, ocupando hábitats muy variados. Su dieta oportunista incluye invertebrados, vertebrados, frutos, semillas y carroña, y residuos humanos en contextos periurbanos, rurales y turísticos (Carrasco et al., 2019; Carrasco et al., 2020). Para comprender estos impactos, una de las estrategias más robustas y de bajo costo es el análisis de heces, método no invasivo que permite conocer la composición de la dieta e identificar residuos antropogénicos (Kohn y Wayne, 1997; Carrasco et al., 2020; Duclos et al., 2025).

Complementariamente, los análisis etológicos constituyen una herramienta clave para evaluar cómo los

animales perciben y responden a estímulos potencialmente disruptivos, permitiendo interpretar sus decisiones conductuales como indicadores de tolerancia, habituación o sensibilización frente al disturbio humano (Taylor y Knight, 2003; Bejder et al., 2009). Este enfoque, centrado en la observación sistemática del comportamiento, aporta una dimensión funcional al estudio ecológico al revelar los umbrales de respuesta ante amenazas percibidas. El análisis de conducta por medio de la medición de la distancia de huida (en adelante FID por sus siglas en inglés Flight Initiation Distance) evalúa la tolerancia animal al disturbio humano, definiendo el punto en que un individuo interrumpe su actividad para evadir una amenaza (Taylor y Knight, 2003).

Por medio de estas aproximaciones metodológicas, el presente estudio propone estimar el grado de influencia de la actividad turística sobre los patrones alimentarios y conductuales de los zorros en un corredor semiárido contiguo a la RNPH, con el propósito de evaluar el impacto indirecto del turismo asociado a la fauna marina sobre la ecología de estas especies generalistas en la Región de Coquimbo. Adicionalmente, se proponen lineamientos orientados a la mitigación de los impactos negativos del turismo y al fortalecimiento de la coexistencia sustentable entre visitantes y fauna silvestre, cuyas proyecciones tienen implicancias tanto locales como para otros contextos de interacción entre turismo y carnívoros generalistas.

Pregunta de Investigación: ¿Cómo influye la actividad turística en la incorporación de residuos antropogénicos en la dieta y en las respuestas conductuales de *Lycalopex spp.* a lo largo del corredor de la Ruta D-110-C hacia Punta de Choros?

Hipótesis: La elevada intensidad turística en el corredor de la Ruta D-110-C se relaciona con la presencia de residuos antropogénicos en la dieta de *Lycalopex spp.*, así como con comportamientos de acercamiento voluntario y distancias reducidas de huida, reflejando un elevado nivel de tolerancia frente a la presencia humana.

Objetivo General: Evaluar los efectos de la actividad turística sobre la dieta y el comportamiento de *Lycalopex griseus* y *Lycalopex culpaeus* a lo largo de la Ruta D-110-C, en la Región de Coquimbo.

Objetivos Específicos:

1) Caracterizar la composición dietaria de *Lycalopex spp.*, incluyendo la presencia de residuos de origen antropogénico, a partir del análisis del contenido de sus heces.

2) Clasificar las respuestas etológicas de acercamiento, indiferencia y huida de *Lycalopex spp.* frente a la presencia de turistas.

Métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica en la región de Coquimbo, comuna de La Higuera, particularmente en la carretera D-110-C que conecta la Ruta 5 Norte ($29^{\circ}33'37''\text{S}$, $71^{\circ}23'09''\text{O}$) con Punta de Choros ($29^{\circ}14'58''\text{S}$, $71^{\circ}28'00''\text{O}$), pasando por el poblado de Los Choros ($29^{\circ}17'27''\text{S}$, $71^{\circ}18'32''\text{O}$). Su altitud asciende desde el nivel del mar hasta ~450 m s.n.m., englobando la Planicie Litoral y el piedemonte de la Cordillera de la Costa (Alarcón Garrido, 2015). La zona posee un clima semiárido costero, con neblinas frecuentes y precipitaciones concentradas en invierno (< 90 mm, Valdivia et al., 2008), característico del sector costero descrito por Alarcón Garrido (2015) en su análisis geológico-climático de la zona. La vegetación se caracteriza por la existencia de especies adaptadas a condiciones semidesérticas, entre las que destacan cactáceas, matorrales y herbáceas (Alarcón Garrido, 2015). En ambientes costeros y de piedemonte de la Región de Coquimbo se han documentado arbustos y subarbustos xerófitos como *Nolana filifolia* (Leubert y Plissock 2006) y especies endémicas del género *Adesmia* (Flores-Toro y Amigo, 2014), junto con formaciones de matorrales y cactáceas propias del Norte Chico (Leubert y Plissock, 2006). Entre la fauna se encuentran especies nativas como reptiles, aves y mamíferos como zorros, guanacos y roedores, y algunas especies introducidas como conejos y liebres (Alarcón Garrido, 2015). La pavimentación de este corredor fue impulsada con el propósito de incrementar la afluencia turística hacia

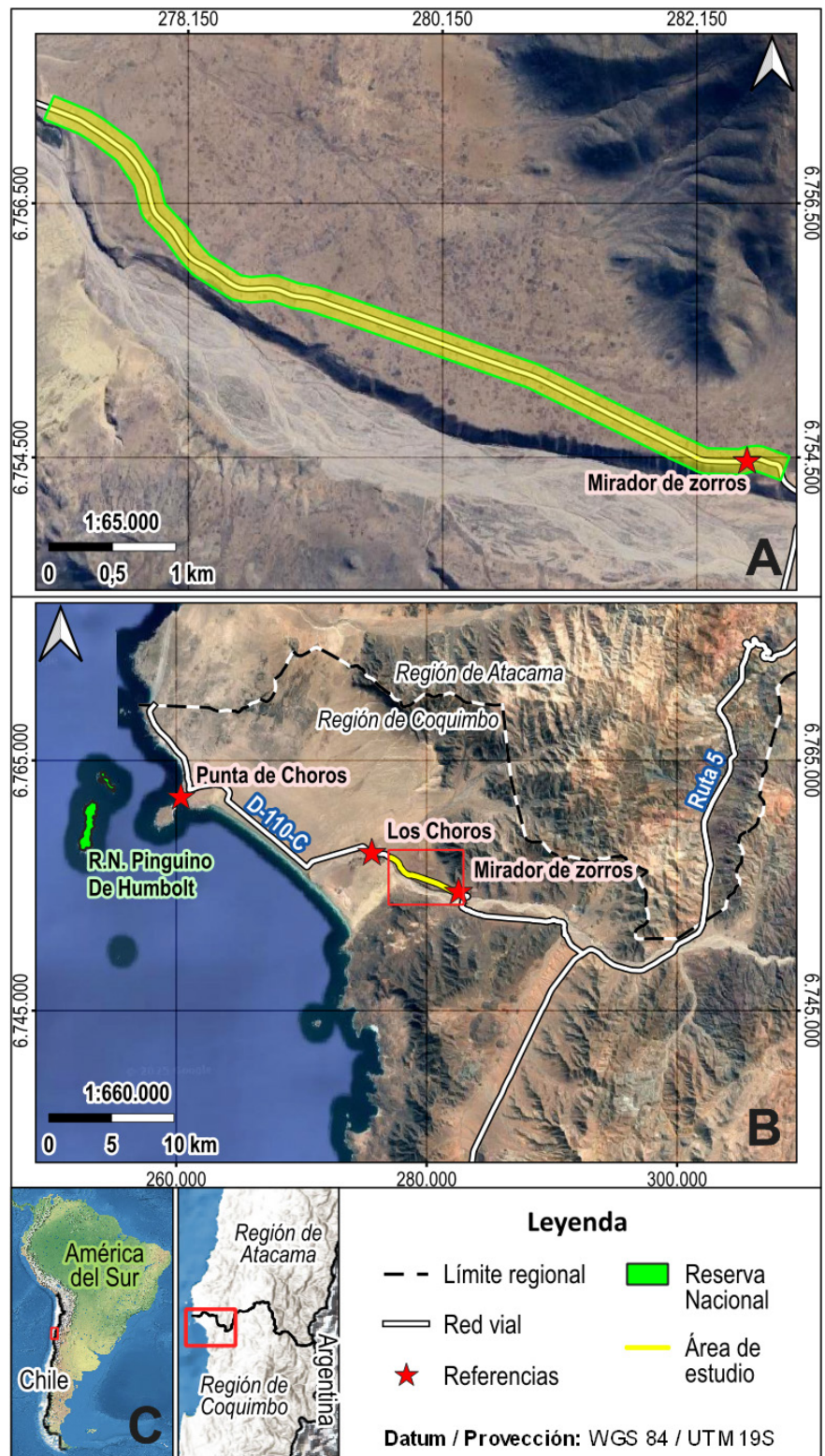


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la Ruta D-110-C, Región de Coquimbo, Chile. (A) Detalle topográfico del sector resaltando en amarillo el área de muestreo y observación. (B) Localización regional en relación con Punta de Choros, Los Choros y la Reserva Nacional Pingüino de Humboldt. (C) Vista general de Sudamérica y la ubicación general de la región de estudio. Se indican límites regionales (línea discontinua), rutas (línea continua), áreas protegidas (verde) y puntos de referencia (estrella roja).

Punta de Choros (Seremi de Obras Públicas Región de Coquimbo, 2018). Esta ruta se considera una de las principales vías de acceso al sitio donde se desarrollan actividades turísticas de intereses especiales asociadas a la RNPH.

El sitio de estudio comprendió un tramo lineal de 8 km de la Ruta D-110-C, seleccionado arbitrariamente entre los puntos (29°20'00,1'' S, 71°13'53,5'' O) y (29°17'42,0'' S, 71°17'32,0'' O) (Figura 1).

Colección y análisis de muestras

Entre el 15 y el 19 de septiembre de 2023, se realizaron observaciones etológicas y se recolectaron heces de zorro chilla (*Lycalopex griseus*) y zorro culpeo (*Lycalopex culpaeus*). Se establecieron 12 cuadrantes de 20 x 20 m (400 m² cada uno), distribuidos en cuatro tramos equiespaciados a lo largo de los 8 km del corredor. Dado que el área total muestreada (< 0,8 km²) es inferior a los ámbitos de hogar estimados para *L. griseus* (12,5–168,6 km²; Moreira-Arce et al., 2025) y *L. culpaeus* (215–1.029 km²; Lagos et al., 2016), todas las muestras se consideraron parte de una única unidad muestral. En cada cuadrante se recolectaron todas las heces atribuibles a *Lycalopex* spp. independientemente de su frescura, siguiendo criterios morfológicos empleados en estudios previos (tubulares con ligera torsión en los extremos; Carrasco et al., 2020), tamaño y contenido (presencia de semillas e invertebrados) diferenciándolas de heces de perros domésticos o ferales (Duclos-Katunaric obs. pers.) Dado que las características de las heces no permiten distinguir inequívocamente entre *L. griseus* y *L. culpaeus*, el análisis se realizó a nivel de género, conforme a lo establecido por Carrasco et al. (2020).

Cada muestra se depositó en una bolsa de papel rotulada, se trasladaron en contenedor isotérmico con acumuladores de frío (Eurofoil®) y se almacenaron a –18°C según el protocolo de campo (Duclos et al., 2025). De las 96 muestras totales, 82 (85,4 %) provinieron del sector mirador-estacionamiento (29°19'12'' S, 71°14'21'' O), principal foco de concentración turística de la Ruta D-110 (ver Figura 1).

En el laboratorio, las heces fueron desinfectadas mediante el uso de calor seco sometiendo a 70°C por dos horas en un horno (Belltronic®, modelo DSO-70) con el fin de eliminar cualquier agente patógeno. Posteriormente se introdujeron en agua tibia con detergente durante 24 a 72 h para su humidificación y posterior tamizado en malla metálica de 1 mm. Una vez eliminada la materia orgánica, el conjunto de contenidos/ítems fueron sometidos a calor seco a 50°C por 24 a 48 h

hasta su secado completo. La separación de contenidos potencialmente identificables se realizó de forma manual utilizando pinzas anatómicas. Cada ítem separado, fue inmerso en agua tibia durante 3 min para eliminar cualquier suciedad que haya quedado adherida y luego en etanol al 70% durante tres minutos para eliminar cualquier componente infeccioso o graso que pudiese quedar (Duclos et al. 2025).

Los contenidos individualizados (ítems) se clasificaron en cuatro categorías principales, según su morfología y naturaleza biológica: (i) Micromamíferos: incluyen restos queratinosos (principalmente pelos) y restos óseos (huesos largos, cráneos parciales, dientes); (ii) Material vegetal: comprenden semillas, fibras y fragmentos de hojas o tallos; (iii) Invertebrados: constituidos por restos quitinosos como élitros, patas segmentadas o exoesqueletos; (iv) Residuos antropogénicos: entre elementos inorgánicos como plástico, papel, metal (e.g., papel de aluminio, llamado aluminio para mayor facilidad), entre otros, y restos orgánicos como alimentos, carozos, legumbres, entre otros. Cada ítem se identificó a ojo desnudo y con lupa estereoscópica (10–40x), utilizando criterios de forma, textura, color y persistencia estructural, siguiendo las recomendaciones de Duclos et al. (2025).

Análisis de datos

Para caracterizar la composición dietaria de *Lycalopex spp.*, se utilizaron los siguientes parámetros:

(i) Frecuencia de ocurrencia (FO%): frecuencia de aparición de cada ítem dietario en el total de heces y expresado en porcentaje.

$$FO_i = (n_i/N) \times 100$$

Observación etológica

Para el análisis conductual, se realizaron recorridos vehiculares (08:00–19:00 h) y de forma oportunista, se documentaron avistamientos de *Lycalopex spp.* utilizando fotografías y video (iPhone SE, 12 MP; Xiaomi Redmi Note 9, 13 MP). Cada encuentro se clasificó en tres categorías: negativa (huida activa ante la presencia humana), neutral (indiferencia o sin alteración visible) y positiva (acercamiento voluntario al humano) (Klein, 1993 modificado). La distancia de huida (FID) se midió como el espacio mínimo en metros, entre el observador y el individuo al interrumpir su conducta y escapar (Blumstein et al., 2005) utilizando una huincha métrica (30 m). En todos los casos, la medición se efectuó desde el observador que se aproximó lentamente desde el punto de avistamiento hasta que el zorro interrumpió su conducta y se retiró.

De los 17 encuentros registrados, nueve permitieron realizar la medición de FID. Esta medición se realizó posterior a la clasificación inicial del comportamiento del zorro en una de las tres categorías etológicas (acercamiento voluntario, respuesta neutra o huida).

Durante el trabajo de campo y de laboratorio, se aplicaron las medidas de bioseguridad recomendadas por Duclos et al. (2025): uso de guantes desechables, mascarilla y gafas de protección, y desinfección de instrumentos con etanol al 70 % tras cada muestreo. En formularios estandarizados y codificados se consignaron las siguientes variables: temporales (fecha, hora), espaciales (coordenadas GPS), etológicas (descripción y clasificación de conducta), dietarias (número y tipo de ítems por muestra).

Resultados y Discusión

A partir de 96 heces analizadas, se logró identificar 363 ítems de diferente origen. La composición dietaria de *Lycalopex spp.* se detalla en la Tabla 1 acorde a las categorías establecidas previamente en la metodología (i) Mamíferos, (ii) Material vegetal, (iii) Invertebrados y (iv) Restos antropogénicos.

Tabla 1. Frecuencia de ocurrencia (FO%) de ítems dietarios de *Lycalopex spp.* a partir del análisis de heces recolectadas en la Ruta D-110-C, Región de Coquimbo, Chile.

Clasificación	Tipo de Ítem	N° Ítem	FO (%)
Mamíferos	restos óseos	31	32,3
	restos queratinosos	75	78,1
Invertebrados	restos quitinosos	81	84,4
Material vegetal	Hierbas	81	84,4
	Semillas	63	65,6
Restos Antropogénicos	goma de mascar	13	43,3
	Plástico	6	20,0
	Caucho	4	13,3
	legumbres	4	13,3
	Papel	1	3,3
	Aluminio	2	6,7
	almendras	2	6,7
Total ítems		363	

Del porcentaje de ocurrencia de restos comúnmente consumidos por *Lycalopex spp.*, predominaron los fragmentos quitinosos (84,4 %) y hierbas (84,4 %), seguidos por pelos (78,1 %), semillas (65,6 %) y restos óseos (32,3 %) (Tabla 1). Los restos óseos y de pelo correspondieron a micromamíferos, aunque no fue posible identificar las especies de forma precisa mediante la técnica de identificación utilizada.

Del total de heces, 30 (31,3 %) contuvieron restos de origen antropogénico. Dentro de estos residuos antrópicos, la goma de mascar fue la más frecuente (43,3 %), seguida por plástico (20 %), caucho y legumbres (13,3 %) (Fig. 2).

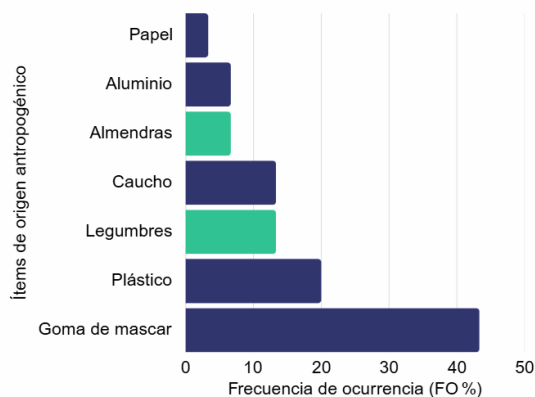


Figura 2. Frecuencia de ocurrencia (FO%) de ítems de origen antropogénico encontrados en heces de *Lycalopex spp.* recolectadas a lo largo de la Ruta D-110-C, Región de Coquimbo. Los ítems se agrupan en dos categorías: Barra azul: Residuos inorgánicos. Barra verde: Residuos orgánicos.

El 86,6 % de los residuos antropogénicos correspondió a materiales inorgánicos (envoltorios, goma de mascar, plásticos, metales), mientras que el 13,4 % a residuos orgánicos (restos de alimentos procesados).

Durante el periodo de observación etológica se registraron 17 encuentros con *Lycalopex spp.* De ellos, 13 (76,5 %) correspondieron a conductas de acercamiento voluntario hacia el observador, mientras que 4 (23,5 %) fueron clasificados como respuestas neutras, sin alteración visible. No se documentaron casos de huida espontánea ante la presencia humana (Fig. 3)

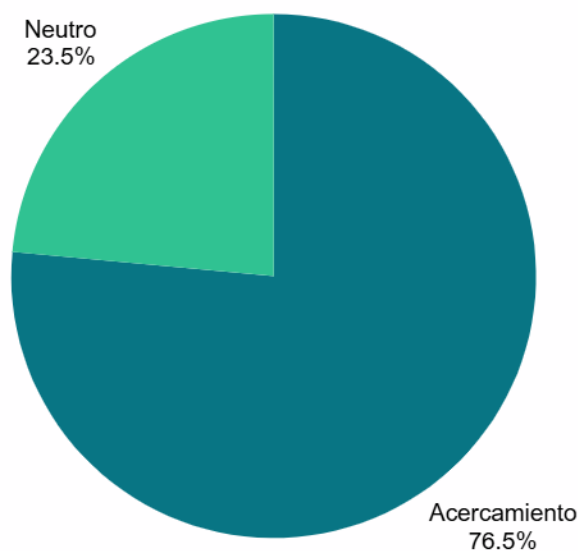


Figura 3. Respuestas etológicas de *Lycalopex spp.* ante la presencia de humanos. Porcentajes de tipos de respuestas observadas en 17 encuentros con zorros a lo largo de la Ruta D-110-C, Región de Coquimbo, Chile.

En nueve encuentros fue posible calcular la distancia de huida (FID), definida como el punto en que el individuo interrumpió su conducta y se alejó tras el acercamiento progresivo del observador.

En todos los casos, la huida ocurrió después de una conducta inicial de acercamiento o indiferencia. Los valores de FID se distribuyen tanto entre individuos que inicialmente mostraron acercamiento como entre aquellos con respuesta neutra. La distancia media registrada fue de 3,6 metros.

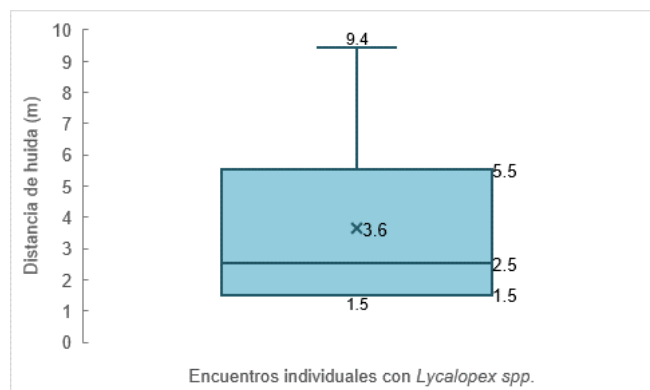


Figura 4. Distancia de huida (FID) registrada en nueve encuentros con *Lycalopex spp.* a lo largo de la Ruta D-110-C, Región de Coquimbo, Chile. Se presentan los valores de FID (en metros).

Consumo de residuos antropogénicos: un patrón recurrente de la fauna silvestre

La presencia de restos antropogénicos en el 31,3 % de las heces analizadas confirma que *Lycalopex spp.* consume frecuentemente desde sitios de disposición de residuos informales en la Ruta D-110-C producto de conductas irresponsables de turistas. En comparación con otros estudios de *Lycalopex spp.*, este valor es similar al 36,7 % registrado en el Parque Nacional Río Clarillo, donde Carrasco et al. (2020) encontraron restos antropogénicos similares como goma de mascar, plástico y frutos secos entre los ítems más frecuentes hallados. Este parque, ubicado en la Región Metropolitana, es un área natural de alta afluencia de público la mayor parte del año por la cercanía y facilidades de acceso desde la ciudad (Carrasco et al., 2020). Asimismo, Carrasco et al. (2019), reportaron consumos comparables de desechos (21,1 %) en heces de *Lycalopex spp.* en el Parque Nacional Torres del Paine, otra área protegida con alta afluencia turística. Otros ejemplos de consumo de origen antropogénico ocurren en sitios de disposición final de desechos domiciliarios como rellenos sanitarios y vertederos. Allí se ha registrado el consumo de restos antrópicos en cóndores andinos, con hallazgos de entre 19 % y 31 % de egagrópilas con

contenido de origen antropogénico (Pavez et al., 2019; Duclos et al., 2020) sugiriendo que este patrón se repite en carroñeros y depredadores oportunistas en ambientes antropizados.

Por otro lado, el 86,6 % del total de desechos ingeridos, correspondió a materiales inorgánicos y el 13,4 % a residuos orgánicos. Desde una perspectiva nutricional, los residuos orgánicos aportan energía rápida, pero son pobres en micronutrientes; los inorgánicos carecen de valor alimenticio y añaden riesgos físicos (obstrucciones, perforaciones) y químicos (aditivos tóxicos, metales pesados). Esta alta proporción de restos inorgánicos hallados respalda la hipótesis de bajo aporte nutricional neto y alto costo sanitario para los zorros (Derraik, 2002; Kühn et al., 2015; Pavez et al., 2019; Plaza y Lambertucci, 2019).

Los registros de consumo de residuos antropogénicos por parte de *Lycalopex spp.*, junto con evidencia comparable en otras especies silvestres, permiten identificar una tendencia en la interacción entre fauna nativa y desechos humanos en ambientes sometidos a presión turística. Esta recurrencia, observada en distintos contextos geográficos y de manejo, sugiere una transformación sostenida en las conductas alimenticias de los depredadores oportunistas, con posibles implicancias ecológicas, sanitarias y de conservación.

Plasticidad trófica: comparación interregional y función dietaria en ambientes semiáridos del Norte Chico

La dieta de *Lycalopex spp.* en la Ruta D-110-C evidencia una notable amplitud trófica, característico de especies generalistas como los zorros (IUCN/SSC Canid Specialist Group, 2004). Todas las categorías dietarias, sin considerar el componente antrópico (ver Tabla 1) se presentaron en porcentajes altos, destacando el consumo de invertebrados y micromamíferos (84 % y 78 % respectivamente), revelando que el zorro cumple múltiples funciones ecológicas: como controlador de artrópodos, depredador de micromamíferos y dispersor de semillas. Este patrón contrasta con el descrito por Carrasco et al. (2019) en el Parque Nacional Torres del Paine, donde los micromamíferos constituyen el 79,8 % de las ocurrencias, seguidos por invertebrados (22,0 %) y semillas (19,3 %). De igual forma, en Río Clarillo Carrasco et al. (2020) reportan una dieta centrada en semillas (93,3 %), pelos de mamíferos (63,3 %) y quitinosos (35,0 %).

Estas diferencias pueden deberse a la estructura trófica particular de cada ambiente y ecosistema, los cuales ofrecen recursos alimenticios distintos en función

de su composición biológica y condiciones ecológicas. En el Norte Chico, las tramas tróficas presentan una alta dependencia de las condiciones climáticas, especialmente del régimen de precipitaciones, que regula la disponibilidad estacional de presas como micromamíferos e invertebrados (Valdivia et al., 2008; Alarcón Garrido, 2015). Esta variabilidad ambiental puede favorecer estrategias alimenticias más flexibles en depredadores oportunistas como *Lycalopex spp.*, cuya plasticidad trófica les permite adaptarse a fluctuaciones en la oferta de recursos (IUCN/SSC Canid Specialist Group, 2004; Carrasco et al., 2020). En contraste, ecosistemas más estables o con mayor cobertura vegetal, como los del centro y sur de Chile, pueden sostener dietas más especializadas o centradas en ítems vegetales, lo que explica las diferencias observadas entre sitios de estudio (Zúñiga et al., 2018; Carrasco et al., 2019; Carrasco et al., 2020).

Preferencia espacial ligada al turismo

La mayor proporción de heces encontradas en los cuadrantes de alta afluencia turística (85,4%) como el “mirador-estacionamiento” utilizado como área de descanso y de atracción para la observación de zorros, respalda que la Ruta D-110-C funciona como sitio de vertidos humanos y centros de atracción para estos cánidos. La pavimentación de esta ruta para potenciar el turismo (Seremi de Obras Públicas Región de Coquimbo, 2018) ha incrementado el acceso y flujo vehicular y, con ello, el volumen de desechos disponible para los zorros. Los residuos actúan como subsidios alimentarios que modifican la conducta y por ello, la distribución y el uso del hábitat por parte de *Lycalopex spp.* Por lo tanto, la interfaz residuos-comportamiento emerge como eje clave para interpretar la alimentación oportunista y el riesgo sanitario a los que se ven sometidos los zorros (Plaza y Lambertucci, 2018; Lagos et al., 2025; Moreira-Arce et al., 2025).

Riesgos sanitarios por plásticos y goma de mascar

La ingestión de plásticos puede bloquear enzimas digestivas, alterar la función reproductiva y causar toxicidad por aditivos (Derraik, 2002). Además, pueden provocar obstrucciones y perforaciones gastrointestinales (Kühn et al., 2015). La goma de mascar, en particular, puede causar obstrucción mecánica del tracto digestivo, y si contiene xilitol, induce hipoglucemia y daño hepático en cánidos (Center for Veterinary Medicine, 2023; Cornell University College of Veterinary Medicine, s. f.). Estos ejemplos de efectos letales y subletales ponen en riesgo la condición corporal, la capacidad reproductiva y la supervivencia de los zorros. Además del consumo de residuos, otro impacto del

turismo asociado a la Ruta D-110-C, y la consecuente atracción de fauna a sitios de tránsito vehicular, es el incremento de atropellos de zorros. Según el proyecto Fauna Impactada, entre 2017 y 2023 se han registrado más de 1.046 atropellos a nivel nacional, siendo el zorro chilla y el zorro culpeo algunas de las especies más afectadas en la Región de Coquimbo (González-Ovalle, 2023; ROC, 2023). Esta problemática, visibilizada por iniciativas ciudadanas, evidencia que los centros de atracción turística sin medidas de mitigación pueden convertirse en zonas de alto riesgo para la supervivencia de estos carnívoros.

Respuestas etológicas y niveles de tolerancia

El 76,5 % de los 17 encuentros documentados correspondió a acercamientos voluntarios, con una distancia media de huida (FID) de 3,63 m. Klein (1993) y Taylor y Knight (2003) coinciden en que distancias cortas de FID indican una evaluación de costos/beneficios donde el acceso fácil a alimento supera el miedo al disturbio. Sin embargo, si bien el FID ha sido ampliamente utilizado como indicador de tolerancia al disturbio humano, su interpretación requiere cautela. En este contexto, la observación de que la mayoría de los individuos (9 de 13) se aproximaron al observador antes de retirarse es un hallazgo relevante. Este comportamiento sugiere que el consumo habitual de desechos humanos en ocasiones facilitado de manera directa por turistas puede estar modulando conductas de acercamiento voluntario hacia las personas. Por ese motivo, tanto la corta distancia de huida como la como la ocurrencia frecuente de acercamientos deben considerarse en conjunto, ya que aportan evidencia complementaria sobre la interacción entre zorros y visitantes en ambientes turísticos. Asimismo, la ausencia de una respuesta evasiva no necesariamente implica habituación o tolerancia, sino que puede reflejar restricciones fisiológicas, ecológicas o contextuales que limitan la capacidad de respuesta del individuo (Bejder et al., 2009). Estas restricciones pueden incluir bajos niveles de energía, ausencia de refugios seguros o una percepción reducida del riesgo, lo que lleva al animal a permanecer en lugar de huir. Por ello, es fundamental aplicar protocolos rigurosos que consideren variables como el estado energético, la disponibilidad de refugio y el tipo de amenaza percibida (Taylor y Knight, 2003; Bejder et al., 2009).

Conclusiones

Este estudio muestra que la alta afluencia turística a lo largo de la Ruta D-110-C se asocia con un consumo recurrente de residuos antropogénicos en la dieta de *Lycalopex spp.*, confirmando que estos mesodepreda-

dores explotan sitios de disposición de residuos informales como recurso alimentario. La composición dietaria revela una marcada plasticidad trófica frente a la heterogeneidad de un paisaje costero semiárido e intervenido. A su vez, las distancias de huida reducidas y el predominio de acercamientos voluntarios (76,5 %) sugieren un patrón de respuesta compatible con tolerancia al disturbio humano. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que el turismo altera tanto la estructura dietaria como los patrones de conducta de los zorros, con posibles consecuencias ecológicas y sanitarias. Además, constituye la primera cuantificación de ingestión de residuos antropogénicos por *Lycalopex spp.* en el Norte Chico, sentando las bases para futuros estudios integrados de dieta y etología en territorios naturales con actividades de turismo asociadas u otros ambientes intervenidos por el ser humano.

Proyecciones

Los resultados de este estudio ofrecen una primera aproximación local sobre la interacción entre turismo y fauna silvestre en el Norte Chico de Chile. A partir de ellos, se plantean líneas de investigación y gestión futura orientadas a comprender en mayor profundidad los efectos del turismo sobre carnívoros generalistas, así como a diseñar medidas que refuercen la salud poblacional y el rol ecológico de estas especies en los ecosistemas.

1. Ampliación del área de estudio: extender los análisis de dieta y comportamiento de *Lycalopex spp.* a otras zonas semiáridas de Chile, con el fin de contrastar resultados bajo diferentes escenarios de intervención antrópica (e.g., sin intervención, rural, urbano). Asimismo, comparar los patrones obtenidos con estudios previos realizados en regiones del centro y sur del país.
2. Monitoreo a largo plazo: dar continuidad a las evaluaciones de dieta y etología para detectar tendencias temporales (e.g., variabilidad estacional e interanual) en la composición alimentaria, consumo de residuos y conductas de acercamiento y tolerancia frente a actividades turísticas y humanas específicas.
3. Estudios de salud poblacional: promover investigaciones colaborativas y de largo plazo que integren biomarcadores de salud y toxicidad en zorros, incorporando tanto muestreos dirigidos como el uso de muestras de oportunidad.
4. Medidas de gestión y manejo: implementar señalética clara y estandarizada sobre el manejo de residuos en áreas naturales, especificando lugares y métodos adecuados de disposición. Complementariamente,

reforzar la prohibición de botar desechos mediante señalética que haga referencia explícita a sanciones.

Estas proyecciones buscan vincular los hallazgos locales con un marco comparativo más amplio, contribuyendo a consolidar la comprensión de la relación entre turismo y fauna silvestre en ecosistemas áridos y semiáridos de Chile, así como a orientar acciones de manejo efectivo en el territorio y extrapolables a cualquier área donde se presente este tipo de interacción.

- Alarcón Garrido MA. (2015). Petrotectónica, deformación y grado de metamorfismo de las rocas del Carbónífero-Pérmico de la Cordillera de la Costa entre los 28°30 y 29°10 S, Región de Atacama y Región de Coquimbo, Chile. Memoria de título, Universidad de Concepción, Concepción, Chile: pp. 6–8.
- Bejder L, Samuels A, Whitehead H, Finn H, Allen S. (2009). Impact assessment research: Use and misuse of habituation, sensitisation and tolerance in describing wildlife responses to anthropogenic stimuli. *Marine Ecology Progress Series* 395: 177–185.
- Blumstein, D., Fernández-Juricic, E., Zollner, P., Garity, S. (2005). Inter-specific variation in avian responses to human disturbance. *Journal of Applied Ecology*, 42(5), 943–953.
- Buckley, R. (2011). Tourism and environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 36, 397–416.
- Carrasco, L., Fuenzalida, S., Zurita, C. (2020). Diferencias en la ingesta de restos de origen antrópico por parte de *Lycalopex culpaeus* y *Lycalopex griseus* entre zonas de alta y baja afluencia de público en el Parque Nacional Río Clarillo. *Brotes Científicos: Revista de Investigaciones Escolares*, 4(1), 29–37.
- Carrasco L., Rodríguez B., Zurita C. (2019). Caracterización del consumo de residuos de origen antrópico en zorros culpeo y gris (*Lycalopex spp.*) en el Parque Nacional Torres del Paine. Proyecto de investigación, Centro de Investigación Científica Escolar (CICE), Santiago, Chile. (in press).
- Center for Veterinary Medicine. (2023, 28 de febrero). Potentially dangerous items for your pet. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/animal-veterinary/animal-health-literacy/potentially-dangerous-items-your-pet> (Consultado el 27 de junio de 2025).
- Colegio Médico Veterinario de Chile. (2023, 14 de agosto). Caso de rabia en Chile. <https://colmevet.cl/noticia/caso-de-rabia-en-chile> (Consultado el 31 de julio de 2025).
- CONAF. (s. f.). Reserva Nacional Pingüino de Humboldt. https://www.conaf.cl/parque_nacionales/reserva-nacional-pinguino-de-humboldt/ (Consultado el 17 de julio de 2025).
- Cortés V. (2024). Centro de visitantes Pingüino de Humboldt: Valorización del paisaje de la Reserva Nacional y revitalización del polo turístico de Punta de Choros. Memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Cornell University College of Veterinary Medicine. (s. f.). Xylitol toxicities. Cornell University. <https://www.vet.cornell.edu/departments-centers-and-institutes/riney-canine-health-center/canine-health-information/xylitol-toxicities> (Consultado el 27 de junio de 2025).
- Curtin, S. (2009). Wildlife tourism: The intangible, psychological benefits of human–wildlife encounters. *Current Issues in Tourism*, 12(5–6), 451–474.
- Derraik, J. G. B. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 44(9), 842–852.
- Duclos M, Silva-Pérez CP, Silva-Aránguiz EM, Jaksic FM, Savelli B, Ossa G. (2025). Cráneos, pelos: Guía de identificación de mamíferos de Chile. Ediciones CAPES UC, segunda edición, Santiago, Chile.
- Duclos-Katunarić M, Roscales JL, Muñoz-Arnanz J, Sabat P, Newsome SD, Jaksic FM, Quirici V, Jiménez B, Galbán-Malagón C. (2025). Latitude and feeding behavior affect persistent organic pollutant concentrations in Andean condors. SSRN Preprints.
- Espinosa A, Llancaman L, Sandoval H. (2014). Turismo de intereses especiales y parques nacionales: Compatibilidad entre turismo y gestión de áreas naturales. *Estudios y Perspectivas en Turismo* 23: 115–130. Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.
- Flores-Toro L. y Amigo J. (2014). Nueva localidad en Chile para *Adesmia resinosa* (Phil. ex Reiche) Martic. (Fabaceae). *Gayana Botánica* 71(2): 131–134.

- González-Ovalle V. (2023). Güiñas, zorros y pudúes entre los mamíferos más afectados por los atropellos de fauna en Chile. Ladera Sur. <https://laderasur.com/articulo/guinass-zorros-y-pudues-entre-los-mamiferos-mas-afectados-por-los-atropellos-de-fauna-en-chile/> (Consultado el 2 de julio de 2025).
- Higham J, Lück M. (2002). Urban ecotourism: A contradiction in terms? *Journal of Ecotourism* 1(1): 36–51.
- IUCN/SSC Canid Specialist Group. (2004). Canids: Foxes, wolves, jackals and dogs. En Sillero-Zubiri C, Hoffmann M, Macdonald DW (eds.), IUCN, Gland, Suiza: 44–50, 56–62.
- Klein ML. (1993). Waterbird behavioral responses to human disturbances. *Wildlife Society Bulletin* 21(1): 31–39.
- Kohn M., Wayne R. (1997). Facts from feces revisited. *Trends in Ecology, Evolution* 12(6): 223–227.
- Kühn S., Rebolledo E.L.B., van Franeker J. (2015). Deleterious effects of litter on marine life. En Bergmann M., Gutow L., Klages M. (eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham, Suiza: 75–116.
- Lagos N., Villalobos R., Vianna J., Espinosa-Miranda C., Rau J., Iriarte A. (2021). The spatial and trophic ecology of culpeo foxes (*Lycalopex culpaeus*) in the high Andes of northern Chile. *Studies on Neotropical Fauna and Environment* 58(3): 564–573.
- Leubert F, Plischoff P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Marín J. (2023). Parvovirus canina: actualización de las estrategias para una inmunización efectiva. Monografía de título, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Moreira-Arce, D., Vergara, P., Oporto, A., Alaniz, A., Hidalgo-Corrorea, C., Zúñiga, A., Gutiérrez, A., Moreno, S., Araya, D., Ciuti, S. (2025). Spatial behavior of meso-carnívoros living in seasonal ecosystems: A case study in arid landscapes in northern-central Chile. *Global Ecology and Conservation*, e03400.
- Moreira, R., Stutzin, M., Servicio Agrícola y Ganadero, División de Protección Pecuaria. (2005). Estudio de la Mortalidad de Zorros en la IV Región. In BVO N° 3 (Marzo – Abril).
- Newsome, D., Moore, S. A., Dowling, R. K. (2013). *Natural area tourism: Ecology, impacts and management* (2ª ed.). Channel View Publications, Bristol, Reino Unido.
- Newsome D. (2020). The collapse of tourism and its impact on wildlife tourism destinations. *Journal of Tourism Futures* 7(3): 295–302.
- Pavez, E., Duclos, M., Rau, J., Sade, S., Jaksic, F. (2019). Evidence of high consumption of waste by the Andean condor (*Vultur gryphus*) in an anthropized environment of Chile. *Ornitología Neotropical* 30: 185–191.
- Plaza P, Lambertucci S. (2018). More massive but potentially less healthy: Black vultures feeding in rubbish dumps differed in clinical and biochemical parameters from wild-feeding birds. *PeerJ* 6: e4645.
- ROC – Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre de Chile. (2023, 7 de febrero). Fauna Impactada: migramos a iNaturalist. RedObservadores.cl. <https://www.redobservadores.cl/fauna-impactada-migramos-a-inaturalist/> (Consultado el 2 de julio del 2025).
- Seremi de Obras Públicas Región de Coquimbo. (2018, 8 de enero). Habilitan tránsito en mejorado acceso a localidad de Los Choros. Gobierno de Chile. <https://coquimbo.mop.gob.cl/habilitan-transito-en-mejorado-acceso-a-localidad-de-los-choros/> (Consultado el 27 de junio de 2025).
- Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR). (2025). Reporte dinámico de visitas a unidades SNASPE. Sistema de Información de Estadísticas en Turismo (SIET). <https://datosturismo.sernatur.cl/siet/reporteDinamicoSNASPE> (Consultado el 5 de julio de 2025).
- Taylor, A. R., Knight, R. L. (2003). Behavioral responses of wildlife to human activity: Terminology and methods. *Wildlife Society Bulletin*, 31(4), 1263–1271.
- Technau B, Unnsteinsdóttir E, Schaafsma F, Kühn S. (2022). Plastic and other anthropogenic debris in Arctic fox (*Vulpes lagopus*) faeces from Iceland. *Polar Biology* 45(8): 1403–1413.
- Valdivia D, Pizarro-Araya J, Cepeda-Pizarro J, Ojanguen-Affilastro A. (2008). Diversidad taxonómica y densidad-actividad de solífugos (Arachnida: Solífugae) asociados a un ecosistema desértico costero del centro norte de Chile. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina* 67(1–2): 1–10.
- Zúñiga A, Fuenzalida V, Sandoval R. (2018). Diet of the South American gray fox *Lycalopex griseus* in an agroecosystem of southern-central Chile. *Therya* 9(2): 179–183.

CARACTERIZACIÓN DE LA FAUNA DE VERTEBRADOS ATROPELLADOS Y REPORTADOS EN *INATURALIST-CHILE*

*CHARACTERIZATION OF ROAD-KILLED
VERTEBRATE FAUNA REPORTED ON INATURALIST-
CHILE*

**Estudiantes**

Rocío Vargas Cruz
Nicolás Cortés Chávez

Curso

IV° A

Profesor guía

César Piñones Cañete,
cesarpinones@colegiosansebastiansalamanca.cl

Asesores Científicos

Víctor Bravo Naranjo y Heraldo V. Norambuena

Colegio

San Sebastián, Salamanca, Región de Coquimbo, Chile.



- Artículo Recibido: 6 de junio, 2025
- Artículo Aceptado: 11 de noviembre, 2025
- Artículo Publicado: 24 de noviembre, 2025

**Participación en Actividades Científicas
y/o Premio**

- * Semana de la Ciencia 2024, ExpoCiencia Nacional Chile

- * Esta publicación está bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 4.0 España de Creative Commons

Resumen

La presente investigación da continuidad a los trabajos de ciencia escolar asociada a los atropellos de fauna en Chile, en donde se han documentado las reacciones de usuarios de redes sociales frente a fotografías de atropellos de fauna silvestre, junto con la elaboración de diseño de señalética caminera. En esta oportunidad se caracterizan los reportes ciudadanos de atropellos de animales nativos, alojados hasta junio de 2024 en la plataforma de ciencia colaborativa *iNaturalist*. Los resultados de este estudio exploratorio arrojaron más de 1400 casos de muertes por atropellos, siendo las aves las más afectadas, seguidas de los mamíferos, reptiles y anfibios. En particular entre los top 3 de especies atropelladas, se encontró a *Philodryas chamissonis* (Culebra de cola larga), con 100 observaciones, seguida de *Mimus thenca* (Tenca chilena), con 66 reportes y *Lycalopex culpaeus* (Zorro culpeo), con 62 registros. En lo que respecta a la distribución de los reportes de atropellos en Chile, los registros presentan una gran asimetría, concentrándose en las grandes carreteras de la zona central y centro norte del país, existiendo importantes vacíos de información en zonas como el norte grande y extremo sur del país. Estos resultados coinciden con estudios realizados por la Corporación Nacional Forestal y llaman a la generación urgente de políticas públicas que aborden el problema a nivel país, considerando los recientes anuncios sobre la incorporación de pasos de fauna en nuevas carreteras y el desarrollo incipiente de campañas educativas por parte del Estado y ONGs.

→ Palabras claves

Atropellos de fauna, ecología de carreteras, pasos de fauna, ciencia ciudadana, conservación de la biodiversidad.

Abstract

This research is a continuation of the school science work associated with wildlife roadkill in Chile, where the reactions of social network users to photographs of wildlife roadkill have been documented, along with the development of road signage design. In this opportunity, the citizen reports of native animal roadkill, hosted until June 2024 in the collaborative science platform *iNaturalist*, are characterized. The results of this exploratory study showed more than 1400 cases of roadkill deaths, with birds being the most affected, followed by mammals, reptiles and amphibians. In particular, among the top 3 species that were run over, we found *Philodryas chamissonis* (Long-tailed snake), with 100 observations, followed by *Mimus thenca* (Chilean tench), with 66 reports, and *Lycalopex culpaeus* (Culpeo fox), with 62 records. Regarding the distribution of reports of roadkill in Chile, the records show a great asymmetry, concentrated in the large highways of the central and northern central zone of the country, with significant gaps of information in areas such as the far north and extreme south of the country. These results coincide with studies conducted by the National Forestry Corporation and call for the urgent generation of public policies to address the problem at the national level, considering the recent announcements on the incorporation of wildlife crossings in new roads and the incipient development of educational campaigns by the State and NGOs.

→ Keywords

wildlife strikes, road ecology, wildlife crossings, citizen science, biodiversity conservation.

Introducción

El atropello de fauna nativa por parte de tráfico vehicular ha sido documentado a lo largo de todo el planeta desde hace varias décadas y se le ha consignado en el cuarto lugar dentro de las 11 principales amenazas a la biodiversidad (Salafsky *et al.*, 2008). Sin embargo, en el caso de Chile la ponderación de la magnitud y alcance del fenómeno se encuentra en etapa iniciales. En ese contexto, destaca el reciente surgimiento de iniciativas de diversa naturaleza, orientadas a la documentación y caracterización del atropello de fauna nativa. Entre estas iniciativas, destacan algunas de ciencia ciudadana (lideradas por organizaciones no gubernamentales), y también algunas organizadas por equipos conformados por académicos, tesisistas, guardaparques e investigadores independientes (Saavedra *et al.*, 2018; Bravo *et al.*, 2019; Grimberg, 2023; Mella y Muñoz, 2024). En particular, se denomina ciencia ciudadana, a un conjunto de actividades y prácticas cuya principal característica es la búsqueda de un enfoque participativo y colaborativo en investigaciones científicas. Un proyecto con una convocatoria abierta a voluntarios para que participen recopilando, analizando y/o interpretando datos en una investigación (Acevedo *et al.* 2020). En este sentido y considerando los importantes vacíos de información que tenemos sobre los atropellos de fauna en Chile, la ciencia ciudadana sobre medioambiente, entendida esta como el esfuerzo mancomunado entre divulgadores, educadores, escolares, ciudadanía en general y equipos de investigadores interesados en la biodiversidad, permite generar una gran cantidad de información sobre temas y escenarios ecológicos complejos, como distribución de las especies y sus amenazas, entre otros (Acevedo, 2018).

A modo de ejemplo, para nuestro país, en 2016 se dio a conocer a la opinión pública la iniciativa de ciencia colaborativa “Fauna Impactada en los Caminos y Carreteras de Chile” (Acevedo, 2018). Con un trabajo de campo inicialmente enfocado en la zona centro-norte del país, este proyecto documentó en corto tiempo que cientos de vertebrados e invertebrados son afectados por colisiones con vehículos (Bravo *et al.*, 2019; Cañoles *et al.*, 2019; Touret *et al.*, 2021). El proyecto Fauna Impactada se configura en la actualidad como la sinergia de tres enfoques de desarrollo de la ciencia; el académico, el ciudadano y el escolar (Piñones y Bravo, 2020), teniendo en la plataforma de ciencia ciudadana *iNaturalist*, un gran aliado para la participación de voluntarios a lo largo de todo Chile, los cuales están compartiendo sus registros de vertebrados e invertebrados atropellados.

Al respecto. El uso de plataformas de ciencia ciudadana como *iNaturalist* permite acceder a un volumen y una cobertura espacial de observaciones difícilmente alcanzables desde proyectos escolares o profesionales. Estas plataformas ofrecen ventajas claras, por ejemplo, mayor número de datos, alcance geográfico amplio y acumulación continua de observaciones, que facilitan la detección de patrones generales a gran escala (Tejeda, 2020). No obstante, su uso implica restricciones metodológicas relevantes, por ejemplo, concentración de registros en áreas más accesibles o con mayor población humana, variabilidad en la calidad de las evidencias (p.ej. fotografías, coordenadas) y sesgos derivados de la heterogeneidad en la experiencia de los observadores. Reconocer este balance entre oportunidades y limitaciones es necesario para interpretar

correctamente los resultados y para situar adecuadamente las conclusiones de estudios a nivel escolar como en este caso.

La presente investigación de carácter descriptivo y exploratorio, continúa lo desarrollado por otros científicos y científicas escolares de la ciudad de Salamanca (Araya *et al.*, 2021; Moyano *et al.*, 2022), en relación con el estudio del fenómeno de los atropellos de fauna en Chile. La pregunta que orientó el presente estudio de ciencia escolar fue ¿Cómo varían las cifras de atropellos entre los distintos grupos y especies de vertebrados nativos terrestres reportados en *iNaturalist-Chile*?

A modo de hipótesis de trabajo, se planteó que el número de registros de atropellos varía entre los distintos grupos taxonómicos de vertebrados, concentrándose los reportes en ciertos grupos de animales por sobre otros. Como objetivo general se buscó: Caracterizar los reportes de atropellos de vertebrados nativos de Chile, documentados en la plataforma de ciencia ciudadana *iNaturalist*. Con respecto a los objetivos específicos, se trabajó en: A) Determinar la distribución de los registros de atropellos en los distintos grupos taxonómicos de vertebrados. B) Describir las especies de vertebrados nativos que presentan mayor número de atropellos en Chile. C) Reconocer de manera general la distribución geográfica de los registros de atropellos a lo largo del país. D) Comentar los alcances de los datos sobre atropellos de fauna almacenados en la plataforma *iNaturalist*.

Metodología

La plataforma *iNaturalist* es un sistema de ciencia ciudadana global que permite a cualquier usuario registrar observaciones de organismos silvestres mediante el uso de fotografías georreferenciadas y, opcionalmente, breves descripciones de comportamiento o contexto. Cada registro incluye la fecha, hora y ubicación precisa del avistamiento, obtenida de la cámara o GPS del dispositivo móvil. Una vez publicada una observación, otros usuarios de la comunidad (naturalistas, aficionados y expertos) pueden proponer identificaciones taxonómicas, las cuales se validan por consenso. Cuando al menos dos identificaciones coinciden y la observación cuenta con evidencia fotográfica y coordenadas exactas, el registro adquiere el estatus de “Grado de Investigación”, que lo hace elegible para su uso en investigaciones. Este sistema de revisión colaborativa cumple la función de un protocolo que garantiza que la información utilizada tenga un nivel mínimo de confiabilidad.

Para el presente estudio, durante el primer semestre de 2024, en el laboratorio de ciencias del Colegio San Sebastián de la ciudad de Salamanca, se analizaron todos los registros de vertebrados atropellados en Chile disponibles en el proyecto “Fauna Impactada en Caminos y Carreteras de Chile (FICCh)”, abarcando un período entre septiembre de 2010 a junio de 2024. En este proyecto se concentran observaciones provenientes de prácticamente todo el territorio nacional, desde la Región de Arica y Parinacota hasta Magallanes, con especial densidad en la zona centro y centro norte del país (véase mapa en inaturalist.org/projects/fauna-impactada-en-las-carreteras-y-caminos-de-chile-ficch).

La selección y depuración de datos, se realizó considerando únicamente los registros con evidencia fotográfica y coordenadas geográficas precisas. Se excluyeron observaciones sin imágenes, con localización imprecisa o con identificaciones marcadas como sin identificar en la plataforma. Este filtro permitió reducir posibles errores de identificación o duplicidad de datos. La revisión y organización de la información se desarrolló en las siguientes etapas: a) creación de cuentas personales en *iNaturalist*; b) suscripción al proyecto FICCh; c) exploración de los mapas de distribución y filtros de búsqueda; y d) cuantificación de los reportes válidos. Este proceso contó con el apoyo de un revisor nacional de datos en *iNaturalist* (A. Cabrera, comunicación personal, 12 de abril de 2024). En esta fase descriptiva, no se realizó una desagregación formal por región administrativa ni por zona ecológica, ya que el propósito principal fue caracterizar el fenómeno de manera general a escala país. Futuros análisis con mayor resolución geográfica se esperan sean motivados por el presente trabajo.

En una segunda etapa, se utilizaron los portales Scielo y Google Scholar, para la búsqueda bibliográfica de publicaciones asociadas tanto al trabajo escolar que ha abordado la problemática de los atropellos de fauna nativa en Chile, como las publicaciones que se han referido a esta amenaza a la biodiversidad en el país y a nivel internacional. Finalmente, se sostuvieron conversaciones vía WhatsApp con asesor científico, quien también proveyó de literatura para su revisión.

Resultados y Discusión

En términos generales, el proyecto Fauna Impactada contuvo información de atropellos de fauna para 185 especies, lo que incluyó tanto animales nativos como introducidos (p.ej. burro, perro), como también vertebrados e invertebrados (p.ej. arácnidos, insectos, moluscos terrestres). Los principales resultados obte-

nidos para cada uno de los objetivos planteados, tras la caracterización de los datos depositados en *iNaturalist*-Chile, con fecha de corte el 13 de junio de 2024, fueron (Figura 1):

A. El total de reportes de atropellos de fauna nativa, fue de 1408 casos. En grupo taxonómico con la mayor proporción de atropellos reportados, fue el de las aves, con un 55.2% del total de los casos (n=697). Seguidamente, el grupo taxonómico con menor proporción de atropellos reportados fue el de los anfibios, con un 7.4% de los reportes (n=93). Por su parte, los mamíferos concentraron el 26.8% de los reportes (n=339) y los reptiles el 10.6% (n=134).

B. De manera más específica, fueron tres las especies que concentraron más reportes de muertes por atropellos. En primer lugar, *Philodryas chamissonis* (Culebra de cola larga), con 100 observaciones/reportes. Le siguió *Mimus thenca* (Tenca chilena), con 66 observaciones y *Lycalopex culpaeus* (Zorro culpeo), con 62 observaciones. Se destacan también varias especies de aves y mamíferos carnívoros entre los 10 primeros puestos de registros (Figura 2 y Figura 3).

C. En términos espaciales, los registros visualizados en los mapas de *iNaturalist* muestran una concentración evidente en las carreteras de la zona central y centro norte del país, con vacíos notables hacia el norte grande y extremo sur. Aunque el estudio no desagrega cuantitativamente por regiones, la tendencia general confirma una alta asimetría geográfica de los atropellos, posiblemente asociada a la densidad de carreteras y población y también la cantidad asimétrica de registros que hacen los distintos voluntarios que participan del proyecto.

D. Los reportes depositados en *iNaturalist*, muestran una perspectiva del fenómeno de los atropellos de una magnitud sorprendente y cruda, tanto por su volumen y calidad de la evidencia, como por la cobertura geográfica alcanzada.

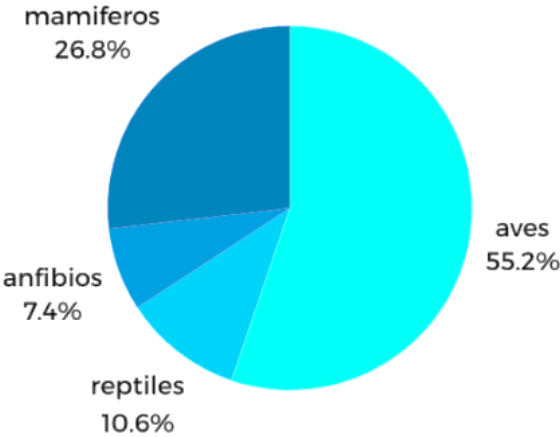


Figura 1: Proporción de atropellos de fauna por grupo taxonómico, reportada en la plataforma *iNaturalist* al 13-06-2024

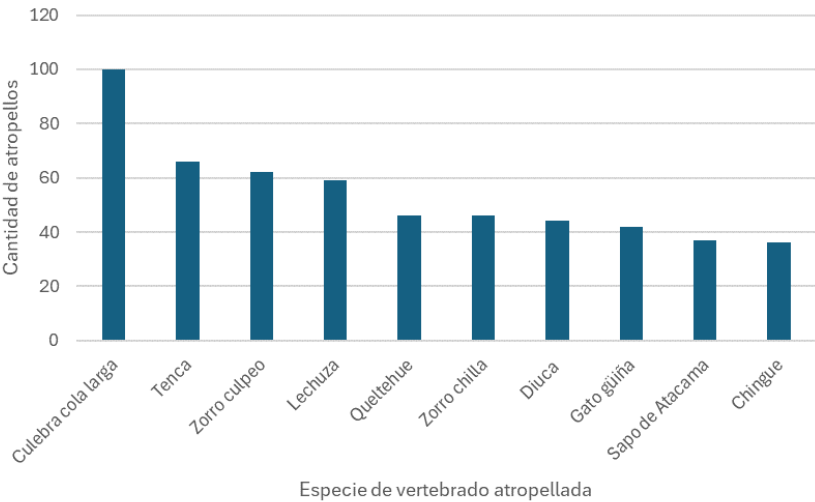


Figura 2: Top 10 de las especies de vertebrados nativos, con mayores registros de atropellos en la plataforma *iNaturalist* al 13-06-2024.



Figura 3: *Philodryas chamissonis* (Culebra de cola larga), es la especie con el mayor número de registros de atropellos dentro del proyecto Fauna Impactada alojado en iNaturalist. Foto por César Piñones Cañete.

Respecto de estas cifras, si bien existen sesgos como una gran cantidad de reportes documentados por algunos usuarios por sobre otros o concentración de reportes en determinadas zonas geográficas en función de la actividad de usuarios específicos, surgen dos perspectivas complementarias, que podrían arrojar luces sobre las causas de los atropellos de fauna en Chile en general y en particular para las tres especies más afectadas por el tráfico rodado. En primer lugar, los resultados obtenidos son en gran medida coherentes con estudios previos realizados en Chile sobre atropellos de fauna silvestre. Por ejemplo, Grimberg (2023) reportó para los parques nacionales de Chile, que las aves constituyen el grupo de vertebrados más afectado por el tráfico vehicular, seguidas de los mamíferos y reptiles, patrón que coincide con el observado en los datos de iNaturalist. De manera similar, Bravo et al. (2019) documentaron una elevada frecuencia de atropellos de aves rapaces en rutas de la zona semiárida del sur de región de Coquimbo, y Mella y Muñoz (2024) encontraron resultados análogos en la región de Magallanes, donde las aves y mamíferos fueron los grupos más impactados durante el verano.

En particular, la revisión y estudio realizado por Grimberg (2023), presenta un modelo que incorpora una serie de alteraciones y efectos que genera la presencia de una carretera en el ambiente. En primer lugar, muchos animales ven fragmentados sus hábitats, especialmente los carnívoros oportunistas que presentan un amplio rango de hogar, como el Zorro culpeo (Iriarte y Jaksic, 2012). Este cánido, dada también su dieta generalista, puede aprovechar los hábitats degradados y nuevas fuentes de alimentos como la basura, que se presentan en los bordes de las carreteras y caminos pavimentados. Por otro lado, dentro del mismo modelo, las carreteras funcionarían como trampas ecológicas para los reptiles, al presentar el asfalto altas temperaturas en verano, cuestión que sería aprovechada por la Culebra de cola larga, para termorregular su temperatura, lo que redundaría en su atropello, cuestión ya reportada por Demangel (2016). Otro factor explicativo, lo constituiría su estrategia anti-depredadora de mantenerse inmóvil frente al tránsito los vehículos sobre la calzada, cuestión discutida por Caballero-Díaz et al. (2024) para otras especies de ofidios.

Ahora bien, la idea de trampa ecológica podría preliminarmente no aplicar para las aves, las cuales serían disuadidas por efecto del ruido (Larreátegui-Palma y Salas, 2025). Sin embargo, aspectos de la ecología de

determinadas especies podrían explicar su elevada muerte en las carreteras del país. Tal es el caso de la Tenca, un ave fácil de observar en distintos ambientes naturales y urbanos, la cual presenta una dieta omnívora, búsqueda de alimento en el piso y de manera oportunista (p.ej. insectos atropellados) y tolerancia a la infraestructura y actividad humana (Martínez y González, 2017). Al respecto, otras especies omnívoras y también abundantes como el Queltehue (*Vanellus chilensis*) o la Diuca (*Diuca diuca*), han sido documentadas en cifras importantes por los observadores ciudadanos en iNaturalist (Figura 2), lo que reforzaría la idea de que especies frecuentes, generalistas en la dieta y tolerantes a la actividad humana, son las más impactadas por el tráfico vehicular, cuestión que también ha sido detectada y evaluada para este grupo de vertebrados, por ejemplo, en Ecuador (Larreátegui-Palma y Salas, 2025).

Es importante también considerar, que estas tres especies que lideran el ranking de los vertebrados nativos atropellados tienen una amplia distribución geográfica tanto altitudinal, como latitudinalmente en Chile (Iriarte y Jaksic, 2012; Demangel, 2016; Martínez y González, 2017) lo que podría también explicar el mayor reporte ciudadano de su muerte por tráfico rodado. Por el contrario, el restringido hábitat que ocupan los anfibios sería un factor que podría explicar la menor ocurrencia de atropellos para dicho grupo. Sin embargo, que el Sapo de Atacama (*Rhinella atacamensis*), se encuentre entre los top 10 con mayor registro de atropellos, podría explicarse por las grandes distancias que deben recorrer los anfibios de ecosistemas mediterráneos hasta sus áreas de reproducción en ríos y esteros, siendo las carreteras barreras para su dispersión (Caballero-Díaz et al., 2024).

Las cifras obtenidas a partir de los reportes de atropellos realizados por científicos ciudadanos a lo largo de todo Chile, muestra una realidad incómoda y perturbadora, la cual tiene un correlato con la investigación académica nacional y también con ejemplos a nivel internacional. En dicho escenario, el no contar con datos sistematizados sobre tráfico, uso de suelo adyacente o abundancia de estas especies en gran parte de los ambientes de Chile, la implementación de medidas para su conservación resultan altamente complejas de implementar, puesto que los impactos de la infraestructura vial van mucho más allá de los atropellos, generando una perturbación constante, modificando el comportamiento e interacción de las especies de fauna y actuando como un factor contribuyente de otras amenazas (Grimberg, 2023; Caballero-Díaz et al., 2024; Larreátegui-Palma y Salas, 2025). Dicha realidad para Chile, recién está siendo dimensionada en magnitud y

alcance, pudiendo estar subestimada por diversos factores asociados a la ecología de carreteras (Mella y Muñoz, 2024), tales como la estacionalidad de los registros, las características de la infraestructura de las rutas pavimentadas, densidad del tráfico, paisaje alrededor de las rutas vehiculares, como también las características biológicas de las especies, como hábitos tróficos, fenología, patrones de movimiento y estrategias de termorregulación (Grimberg, 2023; Caballero-Díaz et al., 2024).

Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio deben leerse con perspectiva crítica. Algunos usuarios con alta actividad contribuyan con un número considerable de registros, generando un sesgo que amplifica la presencia de ciertos grupos o zonas. Este sesgo, no invalida los patrones observados, pero sí sugiere cautela al interpretar las proporciones y distribuciones espaciales. Futuras investigaciones escolares o universitarias podrían abordar este aspecto mediante el análisis separado de los registros provenientes de los usuarios más activos, para evaluar la robustez del patrón general.

Conclusión

Los datos colectados en *iNaturalist*, coinciden en lo general con un estudio dado a conocer a la opinión pública por parte de CONAF, a partir del trabajo de Grimberg (2023) en áreas silvestres protegidas, en donde también las aves, seguidas de los mamíferos y los reptiles, son los grupos de vertebrados más afectados (Corporación Nacional Forestal [CONAF], 2023). En dicho estudio, también los animales más impactados por los atropellos son la Culebra de cola larga y el Zorro culpeo. Si bien, las conclusiones a nivel específico para cada especie deben considerar los sesgos de la información depositada en *iNaturalist*, es un hecho que el tráfico rodado genera en Chile miles de muertes de animales representativos de todos los grupos taxonómicos terrestres. Varias de las especies son comunes en los ecosistemas, como la Tenca. Otras están en serios problemas de conservación, como el Pudú. Algunas especies son carismáticas, como lo son los representantes de los felinos y los cánidos (Araya et al., 2021). Otras, sin embargo, son menos conspicuas y/o socialmente consideradas menos carismáticas, como los anfibios y particularmente las culebras.

En la actualidad el Gobierno de Chile, a través de una alianza entre el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, CONAF y ONGs, realiza una campaña que busca generar conciencia en los usuarios de las carreteras que atraviesan las áreas protegidas del Estado

(Gobierno de Chile, 2024). Dicha campaña, se enfoca en la educación vial con enfoque ambiental y la instalación de señalética caminera, la cual sigue un estándar similar a lo propuesto por Moyano *et al.* (2022), consistente en carteles con forma de rombo, de color amarillo y que incluyen una silueta de animal nativo y una breve leyenda con su nombre e invitación a la preocupación en la conducción. Adicionalmente, se han anunciado la construcción de pasos de fauna en rutas en el norte de Chile (RTNNoticias, 2024), como también en la Isla Grande de Chiloé (véase Ladera Sur, 2024). Si bien estas iniciativas y anuncios son un avance, dada la magnitud de la problemática; tanto en alcance de especies, como extensión geográfica, estos esfuerzos pueden ser calificados como insuficientes, requiriendo políticas públicas que impacten el problema en sus diversas escalas y dimensiones (educación, infraestructura de mitigación, señalética, fiscalización, normativas, etc.).

Finalmente, los resultados de esta primera aproximación escolar refuerzan el valor de las plataformas de ciencia ciudadana como fuente de datos ecológicos abiertos con beneficios para los participantes, sociedad y la propia ciencia (Acevedo *et al.*, 2020; Tejeda, 2020), pero también la necesidad de fortalecer el diseño de estudios más estructurados a lo largo del país. El valor añadido de esta investigación radica en que, a diferencia de los estudios tradicionales que dependen de muestreos específicos y recursos logísticos acotados a pequeñas zonas geográficas (al menos en Chile), los datos de *iNaturalist* permiten un despliegue espacial y temporal mucho más amplio y de bajo costo, gracias a la participación voluntaria de ciudadanos y educadores. Este enfoque colaborativo no solo amplía la cobertura de información sobre atropellos, sino que también democratiza el proceso de generación de conocimiento ecológico, integrando, como en este proyecto, a la comunidad escolar en la discusión de problemas ambientales reales.

Proyección

Futuros trabajos escolares o universitarios podrían, por ejemplo, integrar datos de tráfico, vegetación alrededor de la carretera o uso del suelo, con el objetivo de construir con modelos explicativos más precisos. Por lo demás, dado que los datos tienen información de fecha o temporada, se podrían abordar preguntas como ¿Qué estacionalidad presentan los registros de atropellos para las especies afectadas? Finalmente, en el contexto de la actualización de los expedientes de clasificación de especie impulsados por el Ministerio del Medio Ambiente, se podría indagar para cuál de los vertebrados nativos, los atropellos representan una importante amenaza a su conservación.

Agradecimientos: Al equipo directivo, apoderados y docente Nicolás Alarcón, quienes apoyaron la gestión del proyecto. A Ariel Cabrera Foix, quien prestó asesoría sobre la plataforma *iNaturalist*. El presente proyecto fue presentado en 2024 en la Feria Científica, Tecnológica y Artística de Cochamó, ExpoCiencia Nacional Chile y ValdiCiencia Austral.

- Acevedo, D. (Ed). (2018). *Ciencia ciudadana: Principios, herramientas, proyectos de medioambiente*. Fundación Ciencia Ciudadana.
- Acevedo, D., Pérez, M. y Escobar, S. (2020). ¿Qué es la ciencia ciudadana? En A. Grez, T. Zaviezo y G. Simonetti-Grez (Eds.), *Manual de ciencia ciudadana para la biodiversidad de Magallanes* (pp.14-18). Fundación Kauyeken.
- Araya, I., Cáceres, C., Moyano, C., Roblero, R. y Vargas, R. (2021). Respuesta ciudadana en facebook a los atropellos de fauna nativa en las carreteras de Chile. *Brotos Científicos* 5:17-24
- Bravo, V., Piñones, C., Norambuena, H. y Zuleta, C. (2019). Puntos calientes y factores asociados al atropello de aves rapaces en una ruta costera de la zona semiárida de Chile central. *Ornitología Neotropical*, 30, 208-216.
- Caballero-Díaz, C., Rodríguez, C., Oñorbe, M., García, F.J., Cabezas-Díaz, Sara; López, C., Ayllón, E., D'Amico, M. (2024). Atropellos de anfibios y reptiles en las carreteras españolas: primeros resultados del Proyecto SAFE. *Boletín de la Asociación Herpetológica Española* 35(1), 60-69.
- Cañoles, R., Bravo, V., Fernández, B., Célis, C. y Piñones, C. (5 de julio de 2019). Atropellos de Fauna en Lo Orozco Los Molles Región de Valparaíso, Chile [Póster]. II Seminario de Iniciativas de Conservación de la Biodiversidad en la Zona Norte de Chile, La Serena, Chile.
- Corporación Nacional Forestal. (20 de octubre de 2023). *CONAF da a conocer que 429 ejemplares de fauna nativa murieron por atropellos en áreas protegidas*. <https://www.conaf.cl/conaf-da-a-conocer-que-429-ejemplares-de-fauna-nativa-murieron-por-atropello-en-areas-protegidas/>
- Demangel, D. (2016) Reptiles en Chile. Fauna Nativa Ediciones. 619 pp.
- Gobierno de Chile. (07 de enero de 2024). *“Lento por la fauna”: Campaña llama reducir velocidad para proteger especies nativas*. <https://www.gob.cl/noticias/lento-por-la-fauna-campana-llama-a-reducir-velocidad-para-proteger-especies-nativas/>
- Grimberg, M. (2023). *Atropellos de fauna vertebrada al interior de unidades del sistema nacional de áreas silvestres protegidas del estado (SNASPE): diagnóstico, recomendaciones y propuesta para su línea base y registro*. [Tesis de magíster]. Universidad de Chile.
- Iriarte, A. y Jaksic, F. (2012). *Los Carnívoros de Chile*. Ediciones Flora y Fauna Chile y CASEB-PUC.
- Ladera Sur. (01 de febrero de 2024). *¡Por primera vez en Chile! Nueva carretera en Chiloé tendrá pasos de fauna para proteger a los animales nativos*. <https://laderasur.com/articulo/por-primera-vez-en-chile-nueva-carretera-en-chiloe-tendra-pasos-de-fauna-para-proteger-a-los-animales-nativos/>
- Larreátegui-Palma, M. y Salas, J. (2025). Evaluación de la mortalidad de aves por efecto de carreteras en un área de alto endemismo en el occidente de Ecuador. *El Hornero*, 40(1), 25-39.
- Martínez, D. y González, G. (2017). *Aves de Chile: Guía de campo y breve historia natural*. Ediciones del Naturalista.
- Mella, J. y Muñoz, C. (2024). Efectos de atropellos vehiculares sobre la fauna de aves y mamíferos en Magallanes, en verano. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 52, 7, 1-13.
- Moyano, C., Santana, M. y Vargas, R. (2022). Frena por la fauna: Propuesta de señalética caminera para mitigar los atropellos de animales nativos en Chile. *Brotos Científicos* 6: 17-23
- Piñones, C. y Bravo, V. (2020). Fauna Atropellada: Problema Socio-Ambiental y Oportunidad para la Ciencia Ciudadana y Escolar. *Boletín Biológico*, N°43, 9-12.
- RTNoticias. (31 de mayo de 2024). Ruta costera que unirá las regiones de Atacama y Coquimbo incluirá paso de fauna silvestre, innovadora alternativa de conectividad ecológica en el país. <https://rtnoticias.cl/2024/05/31/nueva-ruta-costera-que-unira-las-regiones-de-atacama-y-coquimbo-incluire-paso-de-fauna-silvestre-innovadora-alternativa-de-conectividad-ecologica-en-el-pais/>
- Saavedra, B., Povea, P., Louit, C. y Chávez-Villavicencio, C. (2018). Atropellos de fauna en la ruta D-705, sector: Illapel-Aucó-Los Pozos (Coquimbo, Chile), incluyendo la Reserva Nacional Las Chinchillas. *Biodiversidata*, 6, 20-26
- Salafsky, N., Salzer, D., Stattersfield, A.J., Hilton-Taylor, C., Neugarten, R., Butchart, S.H., Collen. B., Cox, N., Master, L.L., O'Connor, S. y Wilkie, D. (2008). A standard lexicon for biodiversity conservation: unified classifications of threats and actions. *Conservation Biology*, 22: 897-911.
- Tejeda, I. (2020). Ciencia ciudadana en biodiversidad. En A. Grez, T. Zaviezo y G. Simonetti-Grez (Eds.), *Manual de ciencia ciudadana para la biodiversidad de Magallanes* (pp.19-26). Fundación Kauyeken.
- Touret, A., Piñones, C. y Castillo, N. (2-4 de noviembre de 2021). Caracterización de atropellos de herpetofauna en rutas pavimentadas del norte semiárido de Chile [Resumen de ponencia]. XII Congreso Chileno de Herpetología, Online, Chile.