

Vol. 10, Núm. 1 (2018)

aci

avances
en ciencias e
ingenierías



Vol. 10, Núm. 1 (2018)

aci

avances
en ciencias e
ingenierías

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías

ISSN 1390-5384 (Impreso). ISSN 2528-7788 (En línea)

<http://avances.usfq.edu.ec/>

Quito, Ecuador

Volumen 10, Número 1, diciembre 2018

DOI: <http://dx.doi.org/10.18272/aci.v10i1>

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es una revista científica con revisión por pares (*peer-reviewed*), de acceso abierto (*open access*), e indexada que publica trabajos en ciencias exactas, físicas, biológicas, ambientales, ingenierías, e investigaciones en el interfaz de estas disciplinas desarrollados por científicos de cualquier institución o país.

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías es publicada por **USFQ PRESS**, departamento editorial de la Universidad San Francisco de Quito USFQ y es parte de las siguientes bases, catálogos, índices y repositorios: DOAJ, Latindex, Redalyc, REDI B, Crossref, Google Scholar, Archive.org, Zenodo.

Editor General: Diego F. Cisneros-Heredia, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Asistente editorial: Mateo Flores

Corrección de estilo y ortotipográfica: Mateo Flores, Diego F. Cisneros-Heredia

Consejo Editorial

Andrea Arias, DuPont Pioneer, Johnston, Estados Unidos

Bette Loiselle, University of Florida, Estados Unidos

Carlos Ventura, The University of British Columbia, Canadá

César Costa, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Cesar Zambrano Semblantes, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Diana Alexandra Pazmiño, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Elisa Bonaccorso, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Esteban Suarez, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Eva Lantsoght, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

John Blake, University of Florida, Estados Unidos

Juan Manuel Guayasamin, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Lionel Trojman, Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Luis Rincón, Universidad de Los Andes, Venezuela

Mauricio Rivera-Correa, Universidad de Antioquia, Colombia

Nikolay Aguirre, Universidad Nacional de Loja, Ecuador

Robert Cazar, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

Ruth Mariela Alvarez, Universidad de Carabobo, Venezuela

Salvador Godoy, Instituto Politécnico Nacional, México

Santiago Ron, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador

Stephen J. Walsh, The University of North Carolina at Chapel Hill, Estados Unidos

Producción editorial: Valentina Bravo, Mateo Flores, Diego F. Cisneros-Heredia

Diseño general y de portada: Krushenka Bayas

Webmaster y manejo de OJS: Jaime Páez

Impresión: Ediecuatorial, Quito, Ecuador, diciembre 2018



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial- 4.0 Internacional.

El uso de nombres descriptivos generales, nombres comerciales, marcas registradas, etc. en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que estos nombres están exentos de las leyes y reglamentos de protección pertinentes y, por tanto, libres para su uso general.

La información presentada en esta revista es de entera responsabilidad de sus autores. USFQ PRESS presume que la información es verdadera y exacta a la fecha de publicación. Ni la Editorial, ni los editores, ni los autores dan una garantía, expresa o implícita, con respecto a los materiales contenidos en esta obra ni de los errores u omisiones que se hayan podido realizar.

USFQ PRESS / Revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías

Att. Diego F. Cisneros-Heredia, editor

Universidad San Francisco de Quito USFQ

Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá

Quito 170901, Ecuador.

Correo electrónico: avances@usfq.edu.ec

Contenido

Sección A: Ciencias Exactas y Físicas

Colorimetría mediante fotografía digital para la determinación de azul de metileno: fotodegradación catalizada con TiO₂ 8

Colorimetry through digital photography for the methylene blue determination in photodegradation experiments using TiO₂ as catalyst

Pablo A. Cisneros, Angel S. Intriago-Mendoza, Jean P. Ramos-Galarza

Spectral discretizations of the Darcy's equations with non standard boundary conditions 16

Discretizaciones espectrales de las ecuaciones de Darcy con condiciones del límite no estándar

Jean M. Bernard

Sección B: Ciencias Biológicas y Ambientales

Ranas terrestres en los ecosistemas surandinos de Ecuador IV: Una nueva especie de *Pristimantis* (Anura: Strabomantidae) de los páramos sur del Parque Nacional Sangay 40

Terrestrial frogs in the south Andean ecosystems of Ecuador IV: A new species of *Pristimantis* (Anura: Strabomantidae) of the southern paramos of Sangay National Park

Salomón Ramírez, Carolina P. Reyes-Puig, Diego Batallas, Mario H. Yáñez-Muñoz

Dengue Serotype Differences in Urban and Semi-rural Communities in Ecuador 56

Diferencias en los Serotipos de Dengue en Comunidades Urbanas y Semi-rurales en Ecuador

Sully Márquez, Julio Carrera, Emilia Espín, Sara Cifuentes, Gabriel Trueba, Josefina Coloma, Joseph N. Eisenberg

La Lechuza Campanaria, *Tyto alba* (Strigiformes: Tytonidae) como regulador de plagas en un ecosistema urbano altoandino en el sur del Ecuador 62

Barn Owl, *Tyto alba* (Strigiformes: Tytonidae) as pest control in a high Andean urban ecosystem of southern Ecuador

Bernarda E. Vásquez, Carlos H. Niveló-Villavicencio, Patricio R. Picón, Michelle K. Armijos, Cristina B. Vásquez, Pedro X. Astudillo

Ampliación del rango de distribución de *Rhipidomys leucodactylus* (Rodentia: Cricetidae): una nueva localidad para el Ecuador 72

Extension of the distribution range of *Rhipidomys leucodactylus* (Rodentia: Cricetidae): a new locality in south-eastern Ecuador

Carlos H. Niveló-Villavicencio, Carlos J. Fernández de Córdova, Pedro X. Astudillo

Registro altitudinal inusual de Zorro Andino *Pseudalopex culpaeus* (Carnivora: Canidae) en el sureste de Ecuador 78

Unusual altitudinal record of Culpeo *Pseudalopex culpaeus* (Carnivora: Canidae) in southeastern Ecuador

Leonardo Ordóñez-Delgado, Catherine Vits, Ivonne González, Darwin Valle

Sugerencias para la toma de datos en eventos de biología reproductiva de aves	84
Suggestions for data collection in bird biology reproductive events Héctor F. Cadena-Ortiz	
Nuevos casos de leucismo en peces andinos del género <i>Astroblepus</i> (Siluriformes: Astroblepidae)	96
New records of leucism in Andean fish of the genus <i>Astroblepus</i> (Siluriformes: Astroblepidae) Fernando Anaguano	
Registro del Piquero Pardo <i>Sula leucogaster</i> (Aves: Suliformes: Sulidae) en el Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara, Ecuador	106
Registration of the Brown Booby <i>Sula leucogaster</i> (Birds: Suliformes: Sulidae) in the Santa Clara Island Wildlife Refuge, Ecuador Teddy Ochoa, César Garzón	
Sección C: Ingenierías	
Evaluación de las proporciones de almidón de yuca y emulsificantes para el mejoramiento textural de una torta libre de gluten	112
Evaluation of proportions of cassava starch and emulsifiers for textural improvement of gluten free cake Mariana Vélez, Laura C. Jimenez, Ximena Yépes	
Perceptions on construction-related factors that affect concrete quality, costs and production	126
Percepciones de los factores relacionados a la construcción que afectan la calidad del hormigón, costos y producción Jorge L. Santamaria, Vanessa Valentin	
Localización y reconocimiento de señales de tráfico del Ecuador: Casos Pare y Ceda el Paso	146
Ecuadorian traffic sign localization and recognition: Stop and Yield cases Marco J. Flores-Calero, Cristian Conlago, Jhonny Yunda, Milton Aldas, Carlos Flores	
Proceso editorial	160

aci
avances
en ciencias e
ingenierías

Colorimetría mediante fotografía digital para la determinación de azul de metileno en experimentos de fotodegradación utilizando TiO_2 como catalizador

Pablo A. Cisneros-Pérez*, Ángel S. Intriago-Mendoza, Jean P. Ramos-Galarza

Universidad Regional Amazónica Ikiam

* Autor para correspondencia / Corresponding author, e-mail: pablo.cisneros@ikiam.edu.ec

Colorimetry through digital photography for the methylene blue determination in photodegradation experiments using TiO_2 as catalyst

Abstract

The students of a General Chemistry class made absorbance measurements in different concentration methylene blue solutions, through the color analysis of solutions pictures. They obtained a calibration curve with a $R^2=0.9904$ that was used for the concentration determination of dye samples exposed to sunlight in variable degradation times with TiO_2 as catalyst. The colorimetric method essayed is easy to use and it may be applied in laboratories where a UV-Vis spectrophotometer is not available.

Keywords: Colorimetry, methylene blue, photodegradation, General Chemistry, Environmental Chemistry, TiO_2 .

Resumen

Los estudiantes de un curso de Química General realizaron medidas de absorbancia en disoluciones de diferente concentración de azul de metileno, por medio del análisis de color en fotografías de dichas disoluciones. Las medidas permitieron la construcción de una curva de calibración con un $R^2= 0,9904$, que fue empleada en la determinación de la concentración del colorante en muestras de disolución expuestas a la luz solar en diferentes períodos para su degradación con TiO_2 como catalizador. El método colorimétrico probado es fácil de usar y podría ser aplicado en laboratorios donde no se disponga un espectrofotómetro UV-Vis.

Palabras clave: colorimetría, azul de metileno, fotodegradación, Química General, Química Ambiental, TiO_2 .



Editado por /
Edited by:
Diego F. Cisneros -
Heredia

Recibido /
Received:
2017/02/07

Aceptado /
Accepted:
2017/03/30

Publicado en línea /
Published online:
2018/12/11

Las determinaciones colorimétricas permiten hacer un análisis cuantitativo confiable de especies químicas que absorben radiación electromagnética ultravioleta y visible; por ejemplo, el análisis de hierro en una muestra de agua o de colesterol en una muestra de sangre. También son importantes en el monitoreo de reacciones o procesos químicos, como la fotodegradación de azul de metileno catalizada con TiO_2 , que es un experimento que se ha utilizado para representar un método sostenible de purificación de agua para estudiantes en cursos de Química General o de Ciencias Ambientales. En este experimento el azul de metileno representa un contaminante orgánico, que es removido por un sistema catalítico que utiliza la más renovable de todas las energías, la luz solar [1].

Para entender el rol del TiO_2 en la degradación se parte de que este es un material semiconductor con un valor de banda prohibida (diferencia de energía entre la banda de valencia BV y la banda de conducción BC) de 388 nm o 3,195 eV. Cuando dicho material es irradiado con luz UV ($h\nu$) de la misma longitud de onda que su banda prohibida genera el par electrón/agujero [2]. El electrón en la BC (por reacción con el oxígeno) y el agujero en la BV (por reacción con el H_2O) dan lugar a especies altamente reactivas que permiten la transformación del azul de metileno en productos incoloros (i.e. HCl , H_2SO_4 , HNO_3 y CO_2). En la Fig. 1 se esquematiza el proceso redox que ocurre en las partículas de TiO_2 .

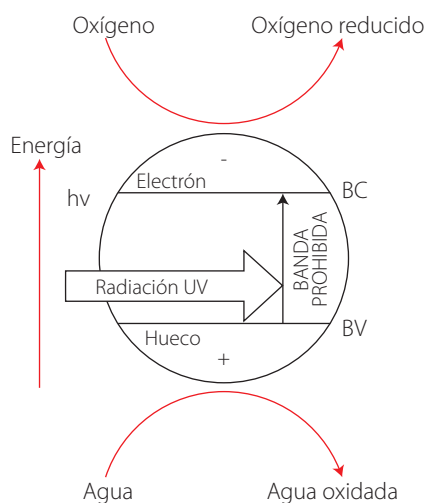
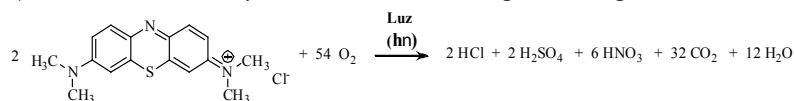


FIGURA 1. Representación esquemática de una partícula de TiO_2 mostrando el par agujero (+)/electrón (-) en la capa de valencia BV y en capa de conducción BC respectivamente.

Cuando un compuesto orgánico se ha transformado en CO_2 y ácidos minerales se considera que se ha degradado por completo (1) [3]. Si bien los productos de reacción podrían parecer contaminantes, presentan menor toxicidad que el contaminante inicial. Se debe recalcar que la fotodegradación es un método que se utiliza para contaminantes que se encuentran en baja concentración (en el rango de los mg/L).





Para conocer la eficiencia de la degradación de azul de metileno es necesario determinar la concentración de este contaminante en diferentes períodos de exposición a una fuente de luz (radiación solar o lámpara UV). Para esto, generalmente se utiliza un espectrofotómetro UV-Vis, muchas veces ausente en un laboratorio de enseñanza básica. No obstante, en los últimos años se han utilizado cámaras digitales para realizar mediciones colorimétricas en diferentes tipos de experimentos como: la determinación de la concentración de colorantes [4] y nanopartículas de oro [5], y en experimentos de cinética química [6, 7].

Las imágenes tomadas por una cámara digital están compuestas por píxeles, los mismos que son la combinación de tres colores: rojo, verde y azul (RBG por sus siglas en inglés). Los valores de intensidad de estos colores en los píxeles están en una escala de 0 a 255 y son los que se usan como medida colorimétrica. Estos valores se pueden obtener por análisis de la fotografía utilizando el programa de procesamiento de imagen digital ImageJ que es un software libre. En este trabajo se presentan los resultados alcanzados por los estudiantes de un curso de Química General en la implementación del método de colorimetría mediante fotografía digital para un experimento de fotodegradación de azul de metileno catalizada por TiO_2 .

El experimento se dividió en 2 sesiones de 3 h cada una. En la primera de ellas se prepararon las disoluciones y se construyó la curva de calibración. En la segunda se hicieron los experimentos de degradación.

Preparación de las disoluciones:

Se pesó en una balanza analítica 43 mg de azul de metileno $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{Cl}_x\text{H}_2\text{O}$ (95%, Lobal Chemie, x varía entre uno y dos; se utilizó un valor de x de 1,5 para realizar los cálculos) y se disolvieron en agua destilada (0,055 $\mu\text{s}/\text{cm}$; Barnstead Smart2Pure de Thermo Scientific) en un matraz aforado de 25 mL. La disolución resultante o "disolución madre" (d.m.) tuvo una concentración de 0,5 mM. Con diferentes volúmenes de d.m. (medidos con una micropipeta automática) se prepararon en matraces aforados 5 disoluciones estándar de 0,15 mM, 0,10 mM, 0,08 mM, 0,04 mM y 0,02 mM.

Construcción de las curvas de calibración:

Se llenaron 5 celdas para espectrofotometría UV-Vis con las 5 disoluciones estándar y una celda con agua destilada que sirvió como blanco. Se tomó una fotografía de todas las disoluciones al mismo tiempo con una cámara Cyber-Shot Sony[®] con la máxima resolución (14,1 megapíxeles) a 40 cm de distancia de la celda, en un lugar con baja exposición a la radiación solar. Con el programa Paint se recortó por triplicado un rectángulo de 120x120 píxeles de cada fotografía correspondiente a cada concentración de azul de metileno y el blanco. En el programa ImageJ se pegó la imagen recortada, haciendo clic en la opción Paste, ubicada en el menú del botón Edit de la barra de herramientas. Para analizar la imagen se hizo clic en RGB Measure ubicado en el menú Analysis del botón Pluggins de la barra de herramientas. Al terminar este procedimiento, se abre una ventana con los valores promedio de la intensidad de los 3 colores rojo, verde y azul, que se copiaron en una hoja MS Excel. De cada concentración se tomaron 3 medidas de intensidad I_r , de la misma forma se tomaron 3 medidas de intensidad del

blanco I_0 . A partir de la Ecuación 1 se calcularon las medidas de la absorbancia A (Tabla 1). Se hicieron las correspondientes curvas de calibración en una hoja de MS Excel para cada color, tomando a la concentración como variable independiente y a la absorbancia como variable dependiente.

$$A = -\log \frac{I_n}{I_0} \quad (1)$$

TABLA 1. Datos de intensidad utilizados para la construcción de la curva de calibración

Concentración 1×10^{-4} oL/L	Intensidad 1			Intensidad 2			Intensidad 3			Intensidad Promedio			Absorbancia U.A.		
	Rojo	Verde	Azul	Rojo	Verde	Azul	Rojo	Verde	Azul	Rojo	Verde	Azul	Rojo	Verde	Azul
0	153,403	154,097	149,469	153,990	154,904	149,430	153,439	154,187	149,338	153,414	154,126	149,412	0,000	0,000	0,000
0,2	39,946	142,666	151,293	40,156	142,647	151,010	40,647	142,516	150,716	40,250	142,610	151,006	0,581	0,034	-0,005
0,4	9,645	130,849	156,692	9,264	130,711	156,471	9,556	130,825	156,698	9,488	130,795	156,620	1,209	0,071	-0,020
0,8	6,307	100,288	149,530	6,039	100,141	149,822	6,021	100,168	150,044	6,122	100,199	149,799	1,399	0,187	-0,001
1	6,499	83,892	141,474	60,257	83,872	141,289	6,267	83,806	141,180	6,341	83,857	141,314	1,384	0,264	0,024
1,5	15,605	60,490	125,778	15,451	60,481	125,603	15,214	60,467	125,390	15,423	60,479	125,590	0,998	0,406	0,075

TABLA 2. Fotodegradación de azul de metileno con TiO_2 como catalizador.

Tiempo (minutos)	Intensidad color verde				Absorbancia U.A.	$C = \frac{A + 0,0205}{0,2784}$ (mM)	$\frac{C}{C_0}$
	1	2	3	Promedio			
0,000	163,091	163,824	163,035	163,317	0,000	0,100	1,000
15,000	91,232	91,852	90,995	91,360	0,252	0,098	0,980
30,000	92,987	93,885	93,957	93,610	0,242	0,094	0,942
45,000	101,318	101,229	102,756	101,768	0,205	0,081	0,811
60,000	131,328	130,446	130,598	130,791	0,096	0,042	0,420
75,000	153,860	153,621	153,083	153,521	0,027	0,017	0,170

Fotodegradación de azul de metileno:

Se preparó 100 mL de una disolución 0,10 mM de azul de metileno en agua destilada. En 6 vasos de precipitación de 50 mL se colocaron 10 mL de esta disolución y 10 mg de dióxido de titanio (Anatasa, 99 %, tamaño de partícula > 25 nm, Aldrich). Los vasos se envolvieron con papel aluminio para protegerlos de la luz. Los experimentos de degradación se llevaron a cabo al medio día (12h00) en un día despejado (Insolación global en Tena, mes de septiembre: 5250 Wh/m²/día [8]) Cada disolución se expuso por un tiempo diferente a la radiación solar, cada una con 15 min de diferencia hasta completar 75 min. A continuación, se centrifugó cada disolución a 3000 rpm durante 5 min para separar y recuperar el óxido de titanio. Las disoluciones resultantes se colocaron en celdas y se tomó una fotografía de todas las muestras al mismo tiempo. Se procedió al análisis del color verde en la fotografía siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Con los valores de absorbancia se determinó la concentración de azul de metileno a diferentes períodos de exposición (Tabla 2).



La determinación de absorbancia, por medición de la intensidad de colores a partir del análisis RGB de la fotografía de las disoluciones de azul de metileno a varias concentraciones, permitió la construcción de las curvas de calibración para cada color (Figura 2). Los indicadores de linealidad R^2 y proximidad a cero de la ordenada al origen [9] se utilizaron como indicadores de linealidad para determinar la mejor curva de calibración. La curva del color rojo presenta las medidas de absorbancia más altas (Tabla 1), lo que está en concordancia con el máximo de absorbancia del azul metileno en 660 nm [2]. Sin embargo, con el color rojo no se alcanza la linealidad para todos los puntos de la curva. Pero, los puntos correspondientes al blanco y las concentraciones de 0,2 y 0,4 mM se ajustan a una línea recta con un $R^2=0,9995$. Esto indica que el análisis de la intensidad del color rojo puede ser útil para la determinación de azul de metileno en muestras con concentración $< 0,8$ mM.

La curva de calibración del color azul muestra las medidas de absorbancia más pequeñas (Tabla 1). Para las concentraciones de 0,2; 0,4 y 0,8 mM, los valores de absorbancia son de igual de magnitud que el blanco (Tabla 2). Al realizar una curva de calibración con las disoluciones 0; 1,0 y 1,5 mM tampoco se alcanza linealidad. La respuesta analítica con este color no es atractiva para realizar determinaciones colorimétricas de azul de metileno mediante fotografía digital.

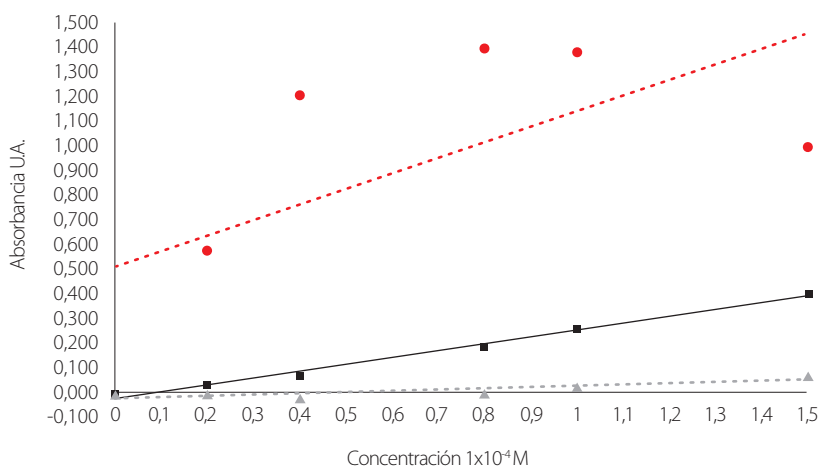


FIGURA 2. Curvas de calibración de azul de metileno utilizando el análisis de fotografías RGB. Círculos (usando el color rojo) cuadrados (usando el color verde), triángulos (usando el color azul).

La curva de calibración para el color verde se ajusta a una línea recta en todo el rango de concentraciones (0 a 1,5 mM) con $R^2 = 0,9904$. Además, la ordenada al origen de esta curva es muy cercana a cero. Esta curva de calibración fue utilizada para determinar la concentración de azul de metileno en el experimento de degradación.

Como se mencionó anteriormente, el máximo de absorbancia del azul de metileno corresponde al color rojo del visible. Esto significa que el color que apreciará el observador será el color complementario al rojo [10] que es el color cian, una mezcla de azul y verde, esto de acuerdo a la teoría del color [11]. El componente verde en el color de las disoluciones fue el más sensible a los cambios de concentración y por esto se alcanzan los mejores resultados. Es importante, que el análisis de color se realice con fotografías de alta resolución, debido a que se deben analizar en la misma fotografía todas las concentraciones de la curva de calibración [4].

Para los experimentos de fotodegradación fue importante considerar el área de iluminación solar recibida por las disoluciones. Algunos experimentos preliminares que se llevaron a cabo en tubos de ensayo tuvieron un área pequeña sometida a iluminación directa (el área circular del tubo), en donde no se observó mayor degradación a pesar de haber sido iluminadas por más de una hora. El proceso de fotodegradación con TiO_2 en disoluciones acuosas se da muy cerca de la superficie del catalizador [3]. Además, se considera que el proceso es trifásico (acuoso, sólido y luz); por lo tanto, para favorecer el proceso de fotodegradación es necesario utilizar capas delgadas de TiO_2 que tengan una exposición directa a la luz UV, lo que demanda áreas de iluminación relativamente grandes [12]. En nuestro experimento logramos estas condiciones cuando se llevó a cabo en vasos de precipitación. Otro factor responsable de la baja fotodegradación de azul de metileno podría ser la absorción de radiación ultravioleta por parte del vidrio.

Cuando el experimento se realizó en vasos de precipitación se observó que existe una relación inversamente proporcional (no lineal) entre el tiempo de exposición y la concentración de azul de metileno, es decir, a mayor tiempo de exposición existe una mayor degradación del colorante (Figura 3). La curva de fotodegradación muestra que en los primeros 30 minutos este proceso transcurre lentamente, alcanzando menos del 10% de degradación. A partir del minuto 45 el proceso es más rápido y varía de manera casi lineal hasta el minuto 75, momento en el que se detuvo el experimento. Se alcanzó una degradación del 83% con respecto a la concentración inicial de azul de metileno luego de 75 minutos de exposición a luz solar.

Existe una relación lineal entre la absorbancia obtenida a partir de valores de intensidad del color verde en fotografías digitales de disoluciones de azul de metileno y sus concentraciones, en un rango entre 0 y 1,5 mM. El método de colorimetría mediante fotografía digital es útil y fácil para monitorear la reacción de fotodegradación de azul de metileno, catalizada con TiO_2 . Este experimento podría llevarse a cabo con alumnos de un curso de Química: General, Analítica o Ambiental.

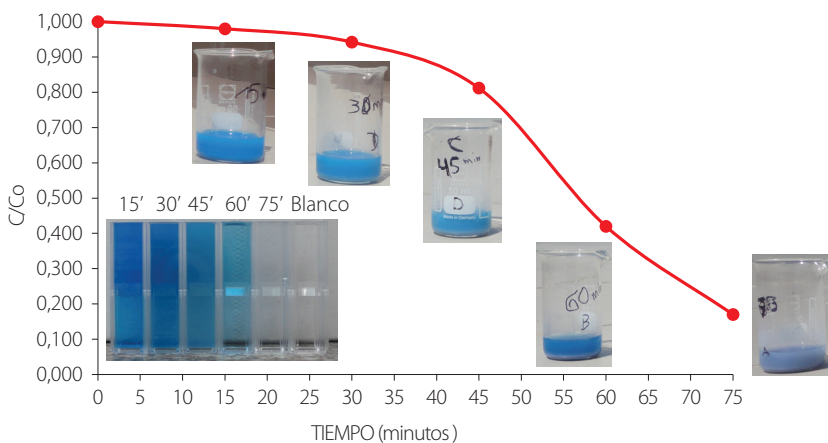


FIGURA 3. Fotodegradación de azul de metileno con TiO_2 .

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Regional Amazónica Ikiam por el financiamiento para este proyecto. A la Dra. Ibeth N. Rendón-Enríquez por sus valiosos comentarios durante la preparación de este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Pablo A. Cisneros Pérez realizó la redacción, concepción y diseño del trabajo; Ángel S. Intriago-Mendoza y Jean P. Ramos-Galarza participaron en la adquisición y análisis de los datos del trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Aubrecht, K. B., Pawda, L., Shen, X., & Bazargan, G. (2015). Development and Implementation of a Series of Laboratory Field Trips for Advanced High School Students to Connect Chemistry to Sustainability. *Journal of Chemical Education*, 92 (4), 631-637. doi: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed500630f>
- [2] Nogueira, R. F. P., & Jardim, W. F. (1993). Photodegradation of Methylene Blue Using Solar Light and Semiconductor (TiO₂). *Journal of Chemical Education* 70 (10), 861-862. doi: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed070p861>
- [3] Xu, C., Rangaiah, G. P., & Zhao, X. S. (2014). Photocatalytic Degradation of Methylene Blue by Titanium Dioxide: Experimental and Modeling Study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53 (38), 14641-14649. doi: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie502367x>
- [4] Kehoe, E., & Penn, R. L. (2013). Introducing Colorimetric Analysis with Camera Phones and Digital Cameras: An Activity for High School or General Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 90 (9), 1191-1195. doi: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed300567p>
- [5] Campos, A. R., Knutson, C. M., Knutson, T. R., Mozzetti, A. R., Haynes, C. L., & Penn, R. L. (2016). Quantifying Gold Nanoparticle Concentration in a Dietary Supplement Using Smartphone Colorimetry and Google Applications. *Journal of Chemical Education*, 93 (2), 318-321. doi: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jchemed.5b00385>
- [6] Knutson, T. R., Knutson, C. M., Mozzetti, A. R., Campos, A. R., Haynes, C. L., & Penn, R. L. (2015). A Fresh Look at the Crystal Violet Lab with Handheld Camera Colorimetry. *Journal of Chemical Education*, 92 (10), 1692-1695. doi: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed500876y>
- [7] Moraes, E. P., Confessor, M. R., & Gasparotto L. H. S. (2015). Integrating Mobile Phones into Science Teaching to Help Students Develop a Procedure to Evaluate the Corrosion Rate of Iron in Simulated Seawater. *Journal of Chemical Education*, 92 (10), 1696-1699. doi: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jchemed.5b00274>
- [8] Corporación para Investigación Energética (2008). *Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica*. Quito: Consejo Nacional de Electricidad.
- [9] Harris, D.C. (2007). *Análisis Químico Cuantitativo 3ª edición*. Barcelona: Reverte.
- [10] Williams, D. R., Flaherty, T.J., Jupe, C.L., Coleman, S.A., Marquez, K.A., & Stanton, J.J. (2007). Beyond λ max: Transforming Visible Spectra into 24-bit Color Values. *Journal of Chemical Education*, 84 (11), 1873-1877. doi: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed084p1873>
- [11] Adobe®. (2016). Technical Guides, Color models. Adobe®. Recuperada de http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/models/rgbcmv.html
- [12] Alexiadis, A., & Mazzarino, I. (2005). Design guidelines for fixed-bed photocatalytic reactors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44 (4), 453-459. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2004.06.009>

Spectral discretizations of the Darcy's equations with non standard boundary conditions

Jean M. Bernard

IUT d'Evry Val d'Essonne, 22, allée Jean-Rostand, 91025 Evry Cedex, France.
Laboratoire d'analyse et probabilité d'Evry Val d'Essonne, Boulevard F. Mitterrand, 91025 Evry Cedex, France.

* Autor para correspondencia/Corresponding author, e-mail: jm.bernard7@gmail.com

Discretizaciones espectrales de las ecuaciones de Darcy con condiciones del límite no estándar

Resumen

Este artículo está dedicado a la aproximación de un problema no estándar de Darcy, que modela el flujo en medios porosos, mediante métodos espectrales: la presión se asigna en una parte del límite. Proponemos dos formulaciones variacionales, así como tres discretizaciones espectrales. La segunda discretización mejora la aproximación de la condición sin divergencia, pero la estimación del error en la presión no es óptima, mientras que la tercera conduce a la estimación óptima del error con una solución discreta sin divergencia, que es importante para algunas aplicaciones. A continuación, su análisis numérico se realiza en detalle y presentamos algunos experimentos numéricos que confirman el interés de la tercera discretización.

Palabras clave: métodos espectrales, ecuaciones de Darcy, condiciones del límite, resultados numéricos.

Abstract

This paper is devoted to the approximation of a nonstandard Darcy problem, which modelizes the flow in porous media, by spectral methods: the pressure is assigned on a part of the boundary. We propose two variational formulations, as well as three spectral discretizations. The second discretization improves the approximation of the divergence-free condition, but the error estimate on the pressure is not optimal, while the third one leads to optimal error estimate with a divergence-free discrete solution, which is important for some applications. Next, their numerical analysis is performed in detail and we present some numerical experiments which confirm the interest of the third discretization.

Keywords: Spectral methods, Darcy equations, boundary conditions, numerical results.



Editado por /
Edited by:
Diego F. Cisneros -
Heredia

Recibido /
Received:
2017/02/27

Aceptado /
Accepted:
2018/07/09

Publicado en línea /
Published online:
2018/12/25

INTRODUCTION

We consider the following Darcy problem:

$$\mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega, \tag{1.1}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } \Omega, \tag{1.2}$$

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = U_0 \quad \text{on } \Gamma^1, \tag{1.3}$$

$$p = \varphi \quad \text{on } \Gamma^2, \tag{1.4}$$

where Ω is the plane square $] - 1, 1[^2$ and $\mathbf{n} = (n_1, n_2)$ is the exterior unit normal to the boundary $\Gamma = \partial\Omega$. The boundary Γ is divided into two parts: the horizontal portion $\Gamma^1 = \{(x, y) \mid -1 < x < 1, y = \pm 1\}$ and the vertical portion $\Gamma^2 = \{(x, y) \mid x = \pm 1, -1 < y < 1\}$. As we can see, the boundary condition on Γ^2 are nonstandard, since we prescribe the value of the pressure on Γ^2 . On the contrary, we have a classical condition on the portion Γ^1 . These conditions are described in the following figure.

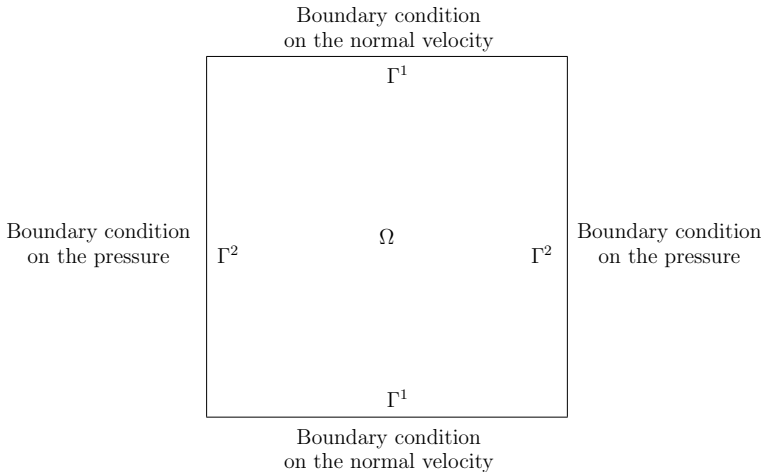


FIGURE 1.1

The equations of the Darcy problem not only modelize the flow in porous media, but also appear in the projection techniques for the solution of Navier-Stokes equations (see [10] and [15]). The nonstandard boundary conditions, where the pressure is assigned on a part of the boundary, have a physical meaning: typically the portion Γ^1 corresponds to rigid walls, whereas the entry or exit of the fluids takes place through Γ^2 . The spectral discretization with this type of boundary conditions was only studied within the framework of the Stokes problem (see [6], [4] and [5]), while Azaïez, Bernardi and Grundmann proposed in [2] the spectral discretization of the standard Darcy problem, where the normal velocity is assigned on the boundary.

This paper is devoted to the spectral discretization of the nonstandard Darcy problem. First, we give two variational formulations. Each one leads us to well-posed problems. Second, we study the regularity of the solution by using a mixed problem of Dirichlet-Neumann for the Laplace operator. Next, from the first variational formulation, we derive a first spectral discretization, which is simple, but, in order to improve the approximation of the divergence-free condition, we study a second spectral discretization, where the inf-sup condition is obtained with more difficulty and where the error estimate on the pressure is not optimal. Finally, the second variational formulation yields a third spectral discretization, which leads us to optimal error estimate and a divergence-free discrete solution.



An outline of this paper is as follows. The two continuous variational problems, as well as the regularity of the solution, are studied in Section 2. Section 3 is devoted to the analysis of three spectral approximations of this problem in the case of homogeneous boundary conditions. In Section 4, we present the algorithms that are used to solve the first and third discretizations, together with some numerical experiments.

STATEMENT OF THE PROBLEM AND NOTATION

In order to set this problem into adequate spaces, recall the definition of the following standard Sobolev spaces (cf. J. Nečas [13]). For any multi-index $k = (k_1, k_2)$ with $k_i \geq 0$, set $|k| = k_1 + k_2$ and denote

$$\partial^k v = \frac{\partial^{|k|} v}{\partial x_1^{k_1} \partial x_2^{k_2}}.$$

Then for any integer $m \geq 0$ and any plane domain Ω whose boundary is Lipschitz-continuous (cf. Grisvard [12]), we define:

$$H^m(\Omega) = \{v \in L^2(\Omega); \partial^k v \in L^2(\Omega) \text{ for } 1 \leq |k| \leq m\},$$

equipped with the seminorm

$$|v|_{H^m(\Omega)} = \left(\sum_{|k|=m} \int_{\Omega} |\partial^k v|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

and norm (for which it is an Hilbert space)

$$\|v\|_{H^m(\Omega)} = \left(\sum_{|k|=0}^m \sum_k \|\partial^k v\|_{L^2(\Omega)}^2 \right)^{1/2}.$$

For extensions of this definition to non-integral values of m (see [11,12]), let s a real number such that $s = m + \sigma$ with $m \in \mathbb{N}$ and $0 < \sigma < 1$. We denote by $H^s(\Omega)$ the space of all distributions u defined in Ω such that $u \in H^m(\Omega)$ and, $\forall |\alpha| = m$,

$$\int_{\Omega} \int_{\Omega} \frac{(\partial^\alpha u(x) - \partial^\alpha u(y))^2}{\|x - y\|^{2+2\sigma}} dx dy < +\infty.$$

It can be shown that $H^s(\Omega)$ is a Hilbert space for the scalar product

$$(u, v)_{s,\Omega} = (u, v)_{m,\Omega} + \sum_{|\alpha|=m} \int_{\Omega} \int_{\Omega} \frac{(\partial^\alpha u(x) - \partial^\alpha u(y))(\partial^\alpha v(x) - \partial^\alpha v(y))}{\|x - y\|^{2+2\sigma}} dx dy. \quad (2.1)$$

Let Γ' be an open part of the boundary $\partial\Omega$ of class $C^{m-1,1}$ and $T_1^{\Gamma'}$ the mapping $v \mapsto v|_{\Gamma'}$ defined on $H^m(\Omega)$. We denote by $H^{m-\frac{1}{2}}(\Gamma')$ (see [7,12]) the space $T_1^{\Gamma'}(H^m(\Omega))$ which is equipped with the norm:

$$\|\varphi\|_{H^{m-\frac{1}{2}}(\Gamma')} = \inf\{\|v\|_{H^m(\Omega)}, v \in H^m(\Omega) \text{ and } v|_{\Gamma'} = \varphi\}. \quad (2.2)$$

In this text, we shall use the spaces $H^{1/2}(\Gamma')$ and $H^{3/2}(\Gamma')$ corresponding to $m = 1$ and 2.

Let us define the space $H_{00}^{1/2}(\Gamma') = \{v|_{\Gamma'}, v \in H^1(\Omega), \forall \mathbf{x} \in \partial\Omega \setminus \Gamma', v|_{\partial\Omega}(\mathbf{x}) = 0\}$. We shall also be interested in the dual space of $H_{00}^{1/2}(\Gamma')$,

$$H^{-1/2}(\Gamma') = (H_{00}^{1/2}(\Gamma'))'. \quad (2.3)$$

We shall use the Hilbert space $H(\text{div}; \Omega) = \{\mathbf{v} \in L^2(\Omega)^2 : \text{div } \mathbf{v} \in L^2(\Omega)\}$, equipped with the norm

$$\|\mathbf{v}\|_{H(\text{div}; \Omega)} = ((\|\mathbf{v}\|_{L^2(\Omega)})^2 + (\|\text{div } \mathbf{v}\|_{L^2(\Omega)})^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.4)$$

For vanishing boundary values, we define:

$$H_0^1(\Omega) = \{v \in H^1(\Omega) : v|_{\partial\Omega} = 0\}.$$

For $\Lambda =]-1, 1[$, we denote the norm in $L^2(\Lambda)$ by $\|v\|_{0,\Lambda} = (\int_{-1}^1 (v(x))^2 dx)^{\frac{1}{2}}$, the seminorm in $H^1(\Lambda)$ by $|v|_{1,\Lambda} = (\int_{-1}^1 (v'(x))^2 dx)^{\frac{1}{2}}$ and the norm in $H^1(\Omega)$ by $\|v\|_{1,\Lambda} = (\int_{-1}^1 ((v(x))^2 + (v'(x))^2) dx)^{\frac{1}{2}}$.

We note $\mathbf{x} = (x, y)$ the generic point of the square Ω and we call $\Gamma_I, \Gamma_{II}, \Gamma_{III}$ and Γ_{IV} the edges of Ω , starting from west and turning counterclockwise. For each $J, J = I, II, III, IV$, the extremities of the edge Γ_J are \mathbf{a}_{J-1} and \mathbf{a}_J , with the convention $\mathbf{a}_0 = \mathbf{a}_{IV}$, the exterior unit normal vector to Γ_J is denoted by \mathbf{n}_J and the counterclockwise unit tangent vector is $\boldsymbol{\tau}_J$. Figure 1.2 below presents this notation.

For any domain Δ in \mathbb{R} or \mathbb{R}^2 and for any nonnegative integer n , $\mathbb{P}_n(\Delta)$ stands for the space of all polynomials on Δ with degree $\leq n$ with respect to each variable. We also use the notation $\mathbb{P}_n^0(\Delta)$ for the subspace $\mathbb{P}_n(\Delta) \cap H_0^1(\Delta)$. For $\Lambda =]-1, 1[$, the family $(L_n)_n$ of Legendre polynomials is a basis of the spaces $\mathbb{P}(\Lambda)$ of polynomials on Λ (we refer to [7, Chap. I] for the properties of the orthogonal polynomials). These polynomials are orthogonal to each other in $L^2(\Lambda)$ and are characterized as follows: for any integer $n \geq 0$, the polynomial L_n is of degree n and satisfies $L_n(1) = 1$. Let us recall some properties that we need. The family $(L_n)_n$ is given by the recursion relation:

$$\begin{cases} L_0 = 1, L_1(\zeta) = \zeta, \\ (n+1)L_{n+1}(\zeta) = (2n+1)\zeta L_n(\zeta) - nL_{n-1}(\zeta), \quad n \geq 1. \end{cases} \tag{2.5}$$

Each polynomial is a solution of the differential equation

$$((1 - \zeta^2)L'_n)' + n(n+1)L_n = 0, \quad n \geq 0, \tag{2.6}$$

and its norm is given by

$$\|L_n\|_{0,\Lambda}^2 = \frac{2}{2n+1}, \quad n \geq 0. \tag{2.7}$$

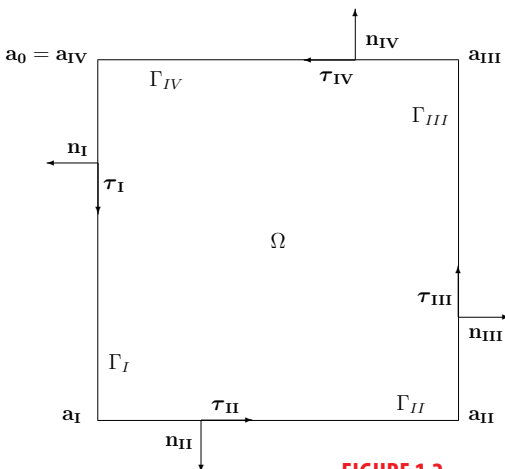


FIGURE 1.2

Three consecutive polynomials are linked by the integral equation



$$\int_{-1}^{\zeta} L_n(\xi) d\xi = \frac{1}{2n+1} (L_{n+1}(\zeta) - L_{n-1}(\zeta)), \quad n \geq 1. \quad (2.8)$$

From (2.6) and integration by parts, we derive

$$L'_n(1) = \frac{n(n+1)}{2}, \quad \|L'_n\|_{0,\Lambda}^2 = n(n+1), \quad (2.9)$$

$$\forall \varphi_n \in \mathbb{P}_n(\Lambda), \quad |\varphi_n|_{1,\Lambda} \leq \sqrt{3}n^2 \|\varphi_n\|_{0,\Lambda}. \quad (2.10)$$

Next, let $N \geq 2$ be a fixed integer. We denote by ξ_j , $0 \leq j \leq N$, the zeros of the polynomial $(1 - \zeta^2)L'_N(\zeta)$ in increasing order. We recall (see [7, Chap. I]) that there exist positive weights ρ_j , $0 \leq j \leq N$, such that the following equality, called the Gauss-Lobatto formula, holds

$$\forall \Phi \in \mathbb{P}_{2N-1}(\Lambda), \quad \int_{-1}^1 \Phi(\zeta) d\zeta = \sum_{j=0}^N \Phi(\xi_j) \rho_j. \quad (2.11)$$

Moreover, it follows from the identity (see [7, Chap. III])

$$\sum_{j=0}^N L_N(\xi_j)^2 \rho_j = (2 + \frac{1}{N}) \|L_N\|_{0,\Lambda}^2, \quad (2.12)$$

that the bilinear form: $(u, v) \rightarrow \sum_{j=1}^N u(\xi_j)v(\xi_j)\rho_j$ is a scalar product on $\mathbb{P}_N(\Lambda)$, since we have

$$\forall v \in \mathbb{P}_N(\Lambda), \quad \|v\|_{0,\Lambda}^2 \leq \sum_{j=0}^N v(\xi_j)^2 \rho_j \leq 3\|v\|_{0,\Lambda}^2. \quad (2.13)$$

THE CONTINUOUS PROBLEM

First variational formulation

We define the subspace $H^1(\Omega; \Gamma') = \{v \in H^1(\Omega) | v = 0 \text{ on } \Gamma'\}$ of $H^1(\Omega)$ and we introduce the space:

$$M = H^1(\Omega; \Gamma^2). \quad (3.1)$$

In the same way as in [1], we consider the following equivalent variational formulation of the problem (1.1)-(1.4):

Find \mathbf{u} in $L^2(\Omega)^2$ and p in $H^1(\Omega)$ such that $p - \varphi$ belongs to M and that

$$\forall \mathbf{v} \in L^2(\Omega)^2, \quad a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + b(\mathbf{v}, p) = \int_{\Omega} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (3.2)$$

$$\forall q \in M, \quad b(\mathbf{u}, q) = \langle U_0, q \rangle_{\Gamma^1}, \quad (3.3)$$

where the bilinear forms a and b are defined by

$$\forall (\mathbf{v}, \mathbf{w}) \in (L^2(\Omega)^2)^2, \quad a(\mathbf{v}, \mathbf{w}) = \int_{\Omega} \mathbf{v}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{w}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (3.4)$$

$$\forall \mathbf{v} \in L^2(\Omega)^2, \quad \forall q \in H^1(\Omega), \quad b(\mathbf{v}, q) = \int_{\Omega} \mathbf{v}(\mathbf{x}) \cdot \nabla q(\mathbf{x}) d\mathbf{x}. \quad (3.5)$$

Theorem 3.1 *Let \mathbf{f} be in $L^2(\Omega)^2$, U_0 in $H^{-1/2}(\Gamma^1)$ and φ in $H^{1/2}(\Gamma^2)$, where $H^{-1/2}(\Gamma^1)$ and $H^{1/2}(\Gamma^2)$ are defined respectively in (2.3) and (2.2). Then problem (3.2), (3.3) has a unique solution satisfying*

$$\|\mathbf{u}\|_{L^2(\Omega)^2} + \|p\|_{H^1(\Omega)} \leq C(\|\mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)} + \|U_0\|_{-1/2,\Gamma^1} + \|\varphi\|_{1/2,\Gamma^2}). \quad (3.6)$$

Proof. First, let us define $\bar{\varphi}$ belonging to $H^{1/2}(\Gamma)$ such that $\bar{\varphi}|_{\Gamma^2} = \varphi$ and $\|\bar{\varphi}\|_{1/2,\Gamma} \leq c\|\varphi\|_{1/2,\Gamma^2}$. To this end, we must extend φ to a function belonging to $H^{1/2}(\Gamma)$. Let μ be a function defined in $[0, 2]$ by

$$\mu(t) = 1 - t, \text{ for } 0 \leq t \leq 1 \text{ and } \mu(t) = 0, \text{ for } 1 \leq t \leq 2.$$

We define $\tilde{\varphi}_{\Gamma_{II}}$ by

$$\tilde{\varphi}(\mathbf{a}_I + t\boldsymbol{\tau}_{II}) = \mu(t)\varphi(\mathbf{a}_0 + (2-t)\boldsymbol{\tau}_I) + \mu(2-t)\varphi(\mathbf{a}_{II} + (2-t)\boldsymbol{\tau}_{III})$$

and $\tilde{\varphi}_{\Gamma_{IV}}$ by

$$\tilde{\varphi}(\mathbf{a}_O - t\boldsymbol{\tau}_{IV}) = \mu(t)\varphi(\mathbf{a}_0 + t\boldsymbol{\tau}_I) + \mu(2-t)\varphi(\mathbf{a}_{II} + t\boldsymbol{\tau}_{III}).$$

Then we have $\|\tilde{\varphi}\|_{1/2,\Gamma} \leq C\|\varphi\|_{1/2,\Gamma^2}$. Next, let Φ in $H^1(\Omega)$ such that $\Phi|_{\Gamma} = \tilde{\varphi}$. Finally, we obtain a function Φ verifying

$$\Phi|_{\Gamma^2} = \varphi \text{ and } \|\Phi\|_{H^1(\Omega)} \leq C\|\varphi\|_{1/2,\Gamma^2}. \tag{3.7}$$

Second, let us extend U_0 to a function belonging to $H^{-1/2}(\Gamma)$. We set $\tilde{U}_{0\Gamma^1} = U_0$ and $\tilde{U}_{0\Gamma^2} = -\frac{1}{2} < U_0, 1 >_{\Gamma^1}$. Then, we have $\|\tilde{U}_0\|_{-1/2,\Gamma} \leq C\|U_0\|_{-1/2,\Gamma^1}$ and $< \tilde{U}_0, 1 >_{\Gamma} = 0$. Next, we define Neumann's Problem:

$$\begin{cases} -\Delta\psi = 0 & \text{in } \Omega \\ \frac{\partial\psi}{\partial n} = \tilde{U}_0 & \text{on } \Gamma \end{cases}$$

and we set $\mathbf{u}_0 = \nabla\psi$. Applying Proposition 1.2 of [11, page 14], we derive that ψ belongs to $H^1(\Omega)$, which implies that \mathbf{u}_0 belongs to $H(\text{div};\Omega)$ with

$$\|\mathbf{u}_0\|_{H(\text{div};\Omega)} = |\psi|_{H^1(\Omega)} \leq C\|\tilde{U}_0\|_{-1/2,\Gamma},$$

since $\text{div } \mathbf{u}_0 = \Delta\psi = 0$. Finally, \mathbf{u}_0 verifies

$$\mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma^1} = U_0, \text{ div } \mathbf{u}_0 = 0 \text{ in } \Omega \text{ and } \|\mathbf{u}_0\|_{H(\text{div};\Omega)} \leq C\|U_0\|_{-1/2,\Gamma^1}. \tag{3.8}$$

Now, let us split p as: $p = \Phi + \tilde{p}$ with \tilde{p} in M and \mathbf{u} as: $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \tilde{\mathbf{u}}$. Then, we can write the problem (3.2),(3.3) as

$$\forall \mathbf{v} \in L^2(\Omega)^2, \quad a(\tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{v}) + b(\mathbf{v}, \tilde{p}) = \int_{\Omega} (\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \nabla\Phi(\mathbf{x}) - \mathbf{u}_0(\mathbf{x})) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}) \, dx. \tag{3.9}$$

$$\forall q \in M, \quad b(\tilde{\mathbf{u}}, q) = 0. \tag{3.10}$$

Since the right-hand side of (3.9) defines a continuous form on $L^2(\Omega)^2$ and since the properties of continuity and ellipticity are obvious we have only to check the following inf-sup condition on the form b (see [11, pages 58,59]):

$$\inf_{q \in M} \sup_{\mathbf{v} \in L^2(\Omega)^2} \frac{b(\mathbf{v}, q)}{\|\mathbf{v}\|_{L^2(\Omega)^2}} \geq \beta \iff \forall q \in M, \quad \sup_{\mathbf{v} \in L^2(\Omega)^2} \frac{b(\mathbf{v}, q)}{\|\mathbf{v}\|_{L^2(\Omega)^2}} \geq \beta\|q\|_{H^1(\Omega)}, \tag{3.11}$$

with a positive constant β . This "inf-sup condition" was introduced independently by Babuska [3] and Brezzi [9]. We can verify this condition by taking $\mathbf{v} = \nabla q$. Indeed, we have

$$\sup_{\mathbf{v} \in L^2(\Omega)^2} \frac{b(\mathbf{v}, q)}{\|\mathbf{v}\|_{L^2(\Omega)^2}} \geq \frac{b(\nabla q, q)}{\|\nabla q\|_{L^2(\Omega)^2}} = |q|_{H^1(\Omega)}$$

and, since $q|_{\Gamma^2} = 0$, using a generalization of Poincaré inequality (see [11, Chap. I, page 40]) yields $\|q\|_{L^2(\Omega)} \leq \mathcal{P}|q|_{H^1(\Omega)}$, which implies

$$\|q\|_{H^1(\Omega)} \leq \sqrt{(\mathcal{P})^2 + 1}|q|_{H^1(\Omega)}.$$

Thus, the "inf-sup condition" is verified with the positive constant $\beta = \frac{1}{\sqrt{(\mathcal{P})^2 + 1}}$. Hence, applying Theorem 2.3 [7, pages 116,117], the theorem follows. \diamond



Second variational formulation

We introduce the space:

$$X = \{ \mathbf{v} \in L^2(\Omega)^2; \operatorname{div} \mathbf{v} \in L^2(\Omega) \text{ and } \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_{\Gamma^1} = 0 \}. \quad (3.12)$$

In an analogous way as in [1], we consider the following equivalent variational formulation of the problem (1.1)-(1.4):

Find \mathbf{u} in X and p in $L^2(\Omega)$ such that $\mathbf{u} - \mathbf{u}_0$ belongs to X , where \mathbf{u}_0 is the function previously constructed that verifies (3.8), and that

$$\forall \mathbf{v} \in X, \quad a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + b^*(\mathbf{v}, p) = \int_{\Omega} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} - \langle \varphi, \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\Gamma^2}, \quad (3.13)$$

$$\forall q \in L^2(\Omega), \quad b^*(\mathbf{u}, q) = 0, \quad (3.14)$$

where the bilinear form b^* is defined by

$$\forall \mathbf{v} \in H(\operatorname{div}; \Omega), \quad \forall q \in L^2(\Omega), \quad b^*(\mathbf{v}, q) = - \int_{\Omega} \operatorname{div} \mathbf{v}(\mathbf{x}) \cdot q(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}. \quad (3.15)$$

In the same way as previously, we split \mathbf{u} as: $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \tilde{\mathbf{u}}$. Then, we can write the problem (3.13),(3.14) as

$$\forall \mathbf{v} \in X, \quad a(\tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{v}) + b^*(\mathbf{v}, p) = \int_{\Omega} (\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{u}_0(\mathbf{x})) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} - \langle \varphi, \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \rangle_{\Gamma^2}. \quad (3.16)$$

$$\forall q \in L^2(\Omega), \quad b^*(\tilde{\mathbf{u}}, q) = 0. \quad (3.17)$$

Since the right-hand side of (3.16) defines a continuous form on X and since the properties of continuity and ellipticity are obvious, we have only to check the following inf-sup condition on the form b^* :

$$\forall q \in L^2(\Omega), \quad \sup_{\mathbf{v} \in X} \frac{b^*(\mathbf{v}, q)}{\|\mathbf{v}\|_{H(\operatorname{div}; \Omega)}} \geq \beta^* \|q\|_{L^2(\Omega)}, \quad (3.18)$$

with a positive constant β^* . Let us note that $q_0 = q - \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} q(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}$ belongs to $L_0^2(\Omega)$ and, owing to a classic result (see [11, Chap. I]), there exists \mathbf{v}_0 in $H_0^1(\Omega)^2$, such that

$$\operatorname{div} \mathbf{v}_0 = -q_0 \quad \text{and} \quad \|\mathbf{v}_0\|_{H^1(\Omega)^2} \leq c \|q_0\|_{L^2(\Omega)}.$$

Then, we set

$$\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1 \quad \text{with} \quad \mathbf{v}_1(x, y) = \left(-\left(\frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} q(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}\right) x, 0 \right), \quad -1 \leq x, y \leq 1.$$

We can verify that $\tilde{\mathbf{v}}$ belongs to X with

$$\operatorname{div} \tilde{\mathbf{v}} = -q \quad \text{and} \quad \|\tilde{\mathbf{v}}\|_{H(\operatorname{div}; \Omega)} \leq C \|\tilde{\mathbf{v}}\|_{H^1(\Omega)^2} \leq C' \|q\|_{L^2(\Omega)},$$

since $|\int_{\Omega} q(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}| \leq \sqrt{|\Omega|} \|q\|_{L^2(\Omega)}$. Then, we have

$$\sup_{\mathbf{v} \in X} \frac{b^*(\mathbf{v}, q)}{\|\mathbf{v}\|_{H(\operatorname{div}; \Omega)}} \geq \frac{b^*(\tilde{\mathbf{v}}, q)}{\|\tilde{\mathbf{v}}\|_{H(\operatorname{div}; \Omega)}} \geq \frac{1}{C'} \|q\|_{L^2(\Omega)}.$$

Hence, we derive the inf-sup condition and we obtain the following result.

Theorem 3.2 *Let \mathbf{f} be in $L^2(\Omega)^2$, U_0 in $H^{-1/2}(\Gamma^1)$ and φ in $H^{1/2}(\Gamma^2)$, where $H^{-1/2}(\Gamma^1)$ and $H^{1/2}(\Gamma^2)$ are defined respectively in (2.3) and (2.2). Then problem (3.13), (3.14) has a unique solution satisfying*

$$\|\mathbf{u}\|_{H(\operatorname{div}; \Omega)} + \|p\|_{L^2(\Omega)} \leq C (\|\mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)} + \|U_0\|_{-1/2, \Gamma^1} + \|\varphi\|_{1/2, \Gamma^2}). \quad (3.19)$$

Regularity results

When the data \mathbf{f} is in $H(\text{div}; \Omega)$, taking the divergence of the first equation of the problem (1.1)-(1.4) and owing to the other equations, we obtain a mixed problem of Dirichlet-Neumann for the Laplace operator:

$$\begin{cases} \Delta p = \text{div } \mathbf{f} & \text{in } \Omega \\ p = \varphi & \text{on } \Gamma^2 \\ \frac{\partial p}{\partial n} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{n} - U_0 & \text{on } \Gamma^1. \end{cases} \tag{3.20}$$

We suppose that \mathbf{f} is in $H^1(\Omega)^2$, φ is in $H^{3/2}(\Gamma^2)$ and U_0 is in $H^{1/2}(\Gamma^1)$. In addition, we assume matching conditions at the vertices of Γ (see [7, Chap I]):

$$\begin{aligned} \int_0^2 \left| \frac{d\varphi}{d\tau_J}(\mathbf{a}_J - t\boldsymbol{\tau}_J) - (\mathbf{f} \cdot \mathbf{n} - U_0)(\mathbf{a}_J + t\boldsymbol{\tau}_{J+1}) \right|^2 \frac{dt}{t} < +\infty, \quad J = I, III \\ \int_0^2 \left| (\mathbf{f} \cdot \mathbf{n} - U_0)(\mathbf{a}_J - t\boldsymbol{\tau}_J) + \frac{d\varphi}{d\tau_{J+1}}(\mathbf{a}_J + t\boldsymbol{\tau}_{J+1}) \right|^2 \frac{dt}{t} < +\infty, \quad J = II, IV. \end{aligned} \tag{3.21}$$

Theorem 3.3 *For any data \mathbf{f} in $H^1(\Omega)^2$, φ in $H^{3/2}(\Gamma^2)$ and U_0 in $H^{1/2}(\Gamma^1)$, where $H^{3/2}(\Gamma^2)$ and $H^{1/2}(\Gamma^1)$ are defined in (2.2), verifying the matching conditions (3.21), the solution (\mathbf{u}, p) of the problem (1.1)-(1.4) belongs to $H^1(\Omega)^2 \times H^2(\Omega)$.*

Proof. Owing to matching conditions (3.21), there exists p_0 in $H^2(\Omega)$ such that $p_0|_{\Gamma^2} = \varphi$ and $(\frac{\partial p_0}{\partial n})|_{\Gamma^1} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{n} - U_0$. Let us set $\tilde{p} = p - p_0$. The problem (3.20) is equivalent to the following problem: find \tilde{p} in $H^1(\Omega; \Gamma^2)$ such that

$$\forall q \in H^1(\Omega; \Gamma^2), \quad a(\nabla \tilde{p}, \nabla q) = \int_{\Omega} (\text{div } \mathbf{f} + \Delta p_0)(\mathbf{x})q(\mathbf{x}) \, dx.$$

Since the boundary between Γ^1 and Γ^2 is the set of vertices of Γ , the regularity of the data implies that this homogeneous mixed problem of Dirichlet-Neumann for the Laplace operator has a solution \tilde{p} in $H^2(\Omega)$ (see [12]). Hence, we derive the regularity of p and \mathbf{u} . \diamond

Remark 3.4 *If $(\mathbf{f} \cdot \mathbf{n} - U_0)$ is Lipschitz-continuous on $\overline{\Gamma_J}$ or belongs to $H^1(\Gamma_J)$, $J = II, IV$ and if φ belongs to $C^{1,1}(\overline{\Gamma_J})$ or to $H^2(\Gamma_J)$, $J = I, III$, the matching conditions (3.21) are equivalent to simpler conditions:*

$$\frac{d\varphi}{d\tau_J}(\mathbf{a}_J) = (\mathbf{f} \cdot \mathbf{n} - U_0)(\mathbf{a}_J), \quad J = I, III \quad \text{and} \quad -\frac{d\varphi}{d\tau_{J+1}}(\mathbf{a}_J) = (\mathbf{f} \cdot \mathbf{n} - U_0)(\mathbf{a}_J), \quad J = II, IV.$$

SPECTRAL DISCRETIZATION

First spectral discretization

We define the discrete scalar product by

$$(u, v)_N = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N u(\xi_i, \xi_j)v(\xi_i, \xi_j)\rho_i\rho_j. \tag{4.1}$$

and we denote by \mathcal{I}_N the Lagrange interpolation operator at the points (ξ_i, ξ_j) , $0 \leq i, j \leq N$ in $\mathbb{P}_N(\Omega)$. We set

$$X_N = \mathbb{P}_N(\Omega)^2 \quad \text{or} \quad X_N = (\mathbb{P}_{N-1}(\Lambda) \otimes \mathbb{P}_N(\Lambda)) \times (\mathbb{P}_N(\Lambda) \otimes \mathbb{P}_{N-1}(\Lambda)). \tag{4.2}$$

We assume that the data \mathbf{f} belongs to $C^0(\overline{\Omega})^2$ and, for the sake of simplicity, that \mathbf{u} and p satisfy homogeneous boundary conditions, that is to say, we set $\varphi = 0$, $U_0 = 0$ in (1.1)-(1.4).



From the variational formulation (3.2)-(3.3), we derive the following discrete problem:
Find \mathbf{u}_N in X_N and p_N in $\mathbb{P}_N(\Omega) \cap M$, where M is defined by (3.1), such that

$$\forall \mathbf{v}_N \in X_N, \quad (\mathbf{u}_N, \mathbf{v}_N)_N + b_N(\mathbf{v}_N, p_N) = (\mathbf{f}, \mathbf{v}_N)_N, \quad (4.3)$$

$$\forall q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap M, \quad b_N(\mathbf{u}_N, q_N) = 0, \quad (4.4)$$

where the form b_N is defined by

$$\forall \mathbf{v}_N \in \mathbb{P}_N(\Omega)^2, \quad \forall q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega), \quad b_N(\mathbf{v}_N, q_N) = (\mathbf{v}_N, \nabla q_N)_N. \quad (4.5)$$

We have a classical saddle point problem. We verify the inf-sup condition

$$\forall q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap M, \quad \sup_{\mathbf{v}_N \in X_N} \frac{b_N(\mathbf{v}_N, q_N)}{\|\mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2}} \geq \gamma \|q_N\|_{H^1(\Omega)}, \quad (4.6)$$

where γ is a positive constant independent from N , by taking $\mathbf{v}_N = \nabla q_N$. Hence, we derive the following theorem.

Theorem 4.1 *Let \mathbf{f} be in $C^0(\overline{\Omega})^2$. Then problem (4.3), (4.4) has a unique solution (\mathbf{u}_N, p_N) satisfying*

$$\|\mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \|p_N\|_{H^1(\Omega)} \leq C \|\mathcal{I}_N \mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)^2}. \quad (4.7)$$

Next, we establish a theorem which implies the convergence of our discretization method.

Theorem 4.2 *Assume that the solution (\mathbf{u}, p) of problem (4.3), (4.4) belongs to $H^s(\Omega)^2 \times H^{s+1}(\Omega)$, $s \geq 0$, and the data \mathbf{f} belongs to $H^\sigma(\Omega)^2$, $\sigma > 1$, where $H^s(\Omega)$, for non-integral values of s , is defined in (2.1). Then, the following estimate holds*

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \|p - p_N\|_{H^1(\Omega)} \leq c \left(N^{-s} (\|\mathbf{u}\|_{H^s(\Omega)^2} + \|p\|_{H^{s+1}(\Omega)}) + N^{-\sigma} \|\mathbf{f}\|_{H^\sigma(\Omega)^2} \right). \quad (4.8)$$

Proof. From the abstract error estimate for the approximation of saddle-point problems (see [7, Chap. IV]), we derive the following estimate:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \|p - p_N\|_{H^1(\Omega)} &\leq c \left(\inf_{\mathbf{w}_N \in V_N} \|\mathbf{u} - \mathbf{w}_N\|_{L^2(\Omega)^2} \right. \\ &+ \inf_{\mathbf{v}_N \in X_N} (\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \sup_{\mathbf{z}_N \in X_N} \frac{\int_{\Omega} \mathbf{v}_N(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{z}_N(\mathbf{x}) \, dx - (\mathbf{v}_N, \mathbf{z}_N)_N}{\|\mathbf{z}_N\|_{L^2(\Omega)^2}} \\ &+ \inf_{q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap M} (\|p - q_N\|_{H^1(\Omega)} + \sup_{\mathbf{z}_N \in X_N} \frac{b(\mathbf{z}_N, q_N) - b_N(\mathbf{z}_N, q_N)}{\|\mathbf{z}_N\|_{L^2(\Omega)^2}} \\ &\left. + \sup_{\mathbf{z}_N \in X_N} \frac{\int_{\Omega} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{z}_N(\mathbf{x}) \, dx - (\mathbf{f}, \mathbf{z}_N)_N}{\|\mathbf{z}_N\|_{L^2(\Omega)^2}} \right), \quad (4.9) \end{aligned}$$

where V_N is defined by

$$V_N = \{\mathbf{w}_N \in X_N; \quad \forall q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap M, \quad b_N(\mathbf{w}_N, q_N) = 0\}.$$

Moreover, we recall (see [11, Chap. II, (1.16)]) that

$$\inf_{\mathbf{w}_N \in V_N} \|\mathbf{u} - \mathbf{w}_N\|_{L^2(\Omega)^2} \leq \frac{c}{\gamma} \inf_{\mathbf{v}_N \in X_N} (\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2}).$$

Hence, we derive that, for all \mathbf{v}_{N-1} and \mathbf{f}_{N-1} in $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2$ and all $q_{N-1} \in \mathbb{P}_{N-1}(\Omega) \cap M$,

$$\begin{aligned} &\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \|p - p_N\|_{H^1(\Omega)} \\ &\leq c(\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_{N-1}\|_{L^2(\Omega)^2} + \|p - q_{N-1}\|_{H^1(\Omega)} + \|\mathbf{f} - \mathbf{f}_{N-1}\|_{L^2(\Omega)^2} + \|\mathbf{f} - \mathcal{I}_N \mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)^2}). \quad (4.10) \end{aligned}$$

Then, we choose $\mathbf{v}_{N-1} = \Pi_{N-1} \mathbf{u}$ (resp. $\mathbf{f}_{N-1} = \Pi_{N-1} \mathbf{f}$), that is to say the orthogonal projection of \mathbf{u} (resp. \mathbf{f}) on $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2$ in $L^2(\Omega)^2$ and $q_{N-1} = \Pi_{N-1}^{1, \Gamma_2} p$, where $\Pi_{N-1}^{1, \Gamma_2} p$ is the orthogonal projection of p on $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega) \cap M$ in $H^1(\Omega)$. It remains to prove the estimate, for any $m \geq 1$,

$$\forall p \in H^m(\Omega) \cap M, \|p - \Pi_{N-1}^{1,\Gamma_2} p\|_{H^1(\Omega)} \leq C N^{1-m} \|p\|_{H^m(\Omega)}. \tag{4.11}$$

On the one hand, this result is obvious for $m = 1$. On the other hand, for $m \geq 2$, we have (see [7, Chap. III]),

$$\begin{aligned} \|p - \Pi_{N-1}^{1,\Gamma_2} p\|_{H^1(\Omega)} &\leq \inf_{r_{N-1} \in \mathbb{P}_{N-1}(\Omega) \cap M} \|p - r_{N-1}\|_{H^1(\Omega)} \\ &\leq \|p - \mathcal{I}_{N-1} p\|_{H^1(\Omega)} \leq C N^{1-m} \|p\|_{H^m(\Omega)}. \end{aligned}$$

Then, an interpolation argument (see [11, TH 1.4, page 6]) gives (4.11). Finally, the result follows from (4.10), (4.11) and the classic estimate for the orthogonal projection on $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)$ in $L^2(\Omega)$. \diamond

Remark 4.3 *With the choice $X_N = \mathbb{P}_N(\Omega)^2$, problem (4.3), (4.4) can be interpreted as a collocation scheme. Indeed, by integrating by parts in the discrete bilinear form b_N with respect to one of the two variables for each of the two terms of b_N (this process being allowed by the precision of the quadrature rule), and choosing as test functions the Lagrange polynomials associated with the grid points of Ξ_N , it is easily seen that (4.3), (4.4) is equivalent to the set of equations for \mathbf{u}_N in $\mathbb{P}_N(\Omega)^2$ and p_N in $\mathbb{P}_N(\Omega) \cap M$:*

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_N(\mathbf{x}) + \nabla p_N(\mathbf{x}) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}), & \forall \mathbf{x} \in \Xi_N, \\ \operatorname{div} \mathbf{u}_N(\mathbf{x}) &= 0, & \forall \mathbf{x} \in \Xi_N \cap \Omega, \\ \frac{2}{N(N+1)} \operatorname{div} \mathbf{u}_N(\mathbf{x}) &= (\mathbf{u}_N \cdot \mathbf{n})(\mathbf{x}), & \forall \mathbf{x} \in \Xi_N \cap \Gamma^1. \end{aligned}$$

Second spectral discretization

In order to improve the approximation of the condition $\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$, we can try to decrease the dimension of the space X_N . So, we choose

$$X_N = \mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2. \tag{4.12}$$

We note that, in this case the forms $b(\cdot, \cdot)$ and $b_N(\cdot, \cdot)$ are equal on $X_N \times \mathbb{P}_N(\Omega)$. It does not appear spurious modes for the pressure, as we can see in the following lemma.

Lemma 4.4 *Let \mathcal{Z}_N be the space*

$$\mathcal{Z}_N = \{q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap M; \forall \mathbf{v}_N \in \mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2, b(\mathbf{v}_N, q_N) = 0\}.$$

Then $\mathcal{Z}_N = \{0\}$.

Proof. Let q_N be in \mathcal{Z}_N . Since $\frac{\partial q_N}{\partial x}$ is a polynomial of degree $\leq N - 1$ with respect to x , which is orthogonal to $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)$, we can write:

$$q_N(x, y) = \alpha_N(y) + \beta_N(x)L_N(y),$$

with α_N and β_N in $\mathbb{P}_N(\Omega)$. In the same way with y in place of x , we have:

$$q_N(x, y) = \gamma_N(x) + \delta_N(y)L_N(x),$$

with γ_N and δ_N in $\mathbb{P}_N(\Omega)$. Hence, we derive

$$q_N(x, y) = \lambda + \mu L_N(x)L_N(y),$$

where λ and μ are real numbers. But, since $L_N(1) = 0$, the condition:

$$\forall y \in [-1, 1], q_N(1, y) = 0$$

implies $\lambda = \mu = 0$. \diamond



We have to study the following discrete problem:

Find \mathbf{u}_N in $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2$ and p_N in $\mathbb{P}_N(\Omega) \cap M$ such that

$$\forall \mathbf{v}_N \in \mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2, \quad (\mathbf{u}_N, \mathbf{v}_N)_N + b(\mathbf{v}_N, p_N) = (\mathbf{f}, \mathbf{v}_N)_N, \quad (4.13)$$

$$\forall q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap M, \quad b(\mathbf{u}_N, q_N) = 0. \quad (4.14)$$

For the inf-sup condition, the choice $\mathbf{v}_N = \nabla q_N$ is no longer available, since \mathbf{v}_N must be in $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2$. In fact, in the next lemma, we find a inf-sup constant depending on N .

Lemma 4.5 *There exists a constant $c > 0$ independent on N such that*

$$\forall q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap H^1(\Omega; \Gamma^2), \quad \sup_{\mathbf{v}_N \in \mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2} \frac{b(\mathbf{v}_N, q_N)}{\|\mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2}} \geq cN^{-1}\|q_N\|_{H^1(\Omega)}. \quad (4.15)$$

Proof. Let us set

$$q_N(x, y) = q_N^*(x, y) + \alpha_N L_N(x) L_N(y), \quad (4.16)$$

where $q_N^*(x, y)$ is orthogonal to $L_N(x)L_N(y)$ for the scalar product in $L^2(\Omega)$. We choose

$$\mathbf{v}_N = \Pi_{N-1}(\nabla q_N^*),$$

where Π_{N-1} is the orthogonal projection operator from $L^2(\Omega)^d$ onto $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^d$, for $d = 1$ or 2 . Then, we have, owing to the properties of orthogonality and a generalization of Poincaré inequality (see [11, Chap. I, page 40]),

$$\frac{b(\mathbf{v}_N, q_N)}{\|\mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2}\|q_N\|_{H^1(\Omega)}} = \frac{b(\mathbf{v}_N, q_N^*)}{\|\mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2}\|q_N\|_{H^1(\Omega)}} \leq c \frac{\|\Pi_{N-1}(\nabla q_N^*)\|_{L^2(\Omega)^2}}{\|\nabla q_N\|_{L^2(\Omega)}}. \quad (4.17)$$

On the one hand, we note that

$$q_N^*(x, y) = \sum_{n=0}^N a_n(x) L_n(y),$$

where a_N is a polynomial of degree $\leq N - 1$. Then, we have

$$\frac{\partial q_N^*}{\partial x}(x, y) = \Pi_{N-1}\left(\frac{\partial q_N^*}{\partial x}\right)(x, y) + a'_N(x) L_N(y),$$

which implies, using (2.7) and the inverse inequality (2.10),

$$\left\| \frac{\partial q_N^*}{\partial x} \right\|_{L^2(\Omega)} \leq \left\| \Pi_{N-1}\left(\frac{\partial q_N^*}{\partial x}\right) \right\|_{L^2(\Omega)} + cN^{\frac{3}{2}} \|a_N\|_{0,\Lambda}. \quad (4.18)$$

On the other hand, in view of (2.8), we can write

$$\Pi_{N-1}\left(\frac{\partial q_N^*}{\partial y}\right)(x, y) = \sum_{n=0}^N \Pi_{N-1}(a_n L'_n)(x, y) = (2N - 1)a_N(x) L_{N-1}(y) + r_N(x, y),$$

where $r_N(x, y)$ is a polynomial of $\mathbb{P}_N(\Omega)$ of degree $< N - 1$ with respect to y . The orthogonality properties imply

$$\left\| \Pi_{N-1}\left(\frac{\partial q_N^*}{\partial y}\right) \right\|_{L^2(\Omega)} \geq 2\sqrt{N - \frac{1}{2}} \|a_N\|_{0,\Lambda}. \quad (4.19)$$

By combining this inequality with (4.18), we obtain

$$\left\| \frac{\partial q_N^*}{\partial x} \right\|_{L^2(\Omega)} \leq \left\| \Pi_{N-1}\left(\frac{\partial q_N^*}{\partial x}\right) \right\|_{L^2(\Omega)} + cN \left\| \Pi_{N-1}\left(\frac{\partial q_N^*}{\partial y}\right) \right\|_{L^2(\Omega)}.$$

In the same way, we have the analogous inequality for $\frac{\partial q_N^*}{\partial y}$. Thus, we obtain

$$\|\nabla q_N^*\|_{L^2(\Omega)^2} \leq cN \|\Pi_{N-1}(\nabla q_N^*)\|_{L^2(\Omega)^2}. \tag{4.20}$$

Next, the equality (4.16) yields

$$\|\nabla q_N\|_{L^2(\Omega)} \leq \|\nabla q_N^*\|_{L^2(\Omega)} + |\alpha_N| \|\nabla(L_N(x)L_N(y))\|_{L^2(\Omega)},$$

which implies, owing to (2.7) and (2.9),

$$\|\nabla q_N\|_{L^2(\Omega)} \leq \|\nabla q_N^*\|_{L^2(\Omega)} + 2\sqrt{\frac{N(N+1)}{2N+1}} |\alpha_N|. \tag{4.21}$$

It remains to estimate $|\alpha_N|$. First, we have, owing to (4.16),

$$q_N(x, y) = \sum_{n=0}^N a_n(x)L_n(y) + \alpha_N L_N(x)L_N(y).$$

But, $\forall y \in [-1, 1]$, $q_N(1, y) = 0$, which implies

$$a_n(1) = 0, \quad n = 1, \dots, N-1 \quad \text{and} \quad a_N(1) + \alpha_N = 0.$$

If we set $a_N(x) = \sum_{k=1}^{N-1} \alpha_k L_k(x)$, we derive

$$\alpha_N = - \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k,$$

and, therefore, thanks to a discrete Cauchy-Schwarz inequality

$$|\alpha_N| \leq \left(\sum_{k=0}^{N-1} \frac{\alpha_k^2}{k + \frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{k=0}^{N-1} \left(k + \frac{1}{2}\right)\right)^{\frac{1}{2}} \leq \frac{\sqrt{2}}{2} N \|a_N\|_{0,\Lambda}.$$

Then, in view of (4.19), we obtain

$$|\alpha_N| \leq \frac{\sqrt{2} N}{4\sqrt{N - \frac{1}{2}}} \|\Pi_{N-1}(\nabla q_N^*)\|_{L^2(\Omega)}. \tag{4.22}$$

Finally, (4.20), (4.21) and (4.22) yield

$$\|\nabla q_N\|_{L^2(\Omega)^2} \leq cN \|\Pi_{N-1}(\nabla q_N^*)\|_{L^2(\Omega)}$$

which, in view of (4.17), ends the proof. \diamond

The bilinear form $(\cdot, \cdot)_N$ and $b(\cdot, \cdot)$ satisfy Brezzi's conditions with respect to $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2$ and $\mathbb{P}_N(\Omega) \cap M$ (the bilinear form $(\cdot, \cdot)_N$ is continuous on $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2$ and elliptic on $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega)$, the bilinear form $b(\cdot, \cdot)$ is continuous on $\mathbb{P}_{N-1}(\Omega) \times (\mathbb{P}_N(\Omega) \cap M)$ and verifies the "inf-sup condition", see [7, Theorem 2.3, pages 116,117], whence the theorem.

Theorem 4.6 *Let \mathbf{f} be in $C^0(\overline{\Omega})^2$. Then problem (4.13), (4.14) has a unique solution (\mathbf{u}_N, p_N) satisfying*

$$\|\mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + N^{-1} \|p_N\|_{H^1(\Omega)} \leq C \|\mathcal{I}_N \mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)^2}. \tag{4.23}$$

We establish the convergence of this second discretization in the following theorem.

Theorem 4.7 *Assume that the solution (\mathbf{u}, p) of problem (4.13), (4.14) belongs to $H^s(\Omega)^2 \times H^{s+1}(\Omega)$, $s \geq 0$, and the data \mathbf{f} belongs to $H^\sigma(\Omega)^2$, $\sigma > 1$. Then, the following estimate holds*

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + N^{-1} \|p - p_N\|_{H^1(\Omega)} \leq c \left(N^{-s} (\|\mathbf{u}\|_{H^s(\Omega)^2} + \|p\|_{H^{s+1}(\Omega)}) + N^{-\sigma} \|\mathbf{f}\|_{H^\sigma(\Omega)^2} \right). \tag{4.24}$$



Proof. The abstract error estimate, analogous to (4.39) but with much simplification because of the exactness of the quadrature formulas, yields

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + N^{-1}\|p - p_N\|_{H^1(\Omega)} \leq c \left(\inf_{\mathbf{w}_N \in V_N} \|\mathbf{u} - \mathbf{w}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \inf_{\mathbf{v}_N \in \mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \inf_{q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap M} \|p - q_N\|_{H^1(\Omega)} + \|\mathbf{f} - \mathcal{I}_N \mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)^2} \right),$$

where V_N is now the space

$$V_N = \{\mathbf{w}_N \in \mathbb{P}_{N-1}(\Omega)^2; \forall q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega) \cap M, b(\mathbf{w}_N, q_N) = 0\}.$$

It remains to estimate the term $\inf_{\mathbf{w}_N \in V_N} \|\mathbf{u} - \mathbf{w}_N\|_{L^2(\Omega)^2}$. Since \mathbf{u} is such that $\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$ and $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma^1} = 0$, there exist a unique ψ in $H^1(\Omega)$ (see [11, Chap. I and 4]) such that

$$\mathbf{u} = \operatorname{curl} \psi \quad \text{and} \quad \psi = 0 \text{ on } \Gamma^1.$$

Moreover, if \mathbf{u} belongs to $H^s(\Omega)^2$, we have $\|\psi\|_{H^{s+1}(\Omega)} \leq c\|\mathbf{u}\|_{H^s(\Omega)^2}$. Let us define the operator $\tilde{\pi}_N^1$ (see [7, Chap. II]) on $H^1(\Lambda)$ by

$$\forall \varphi \in H^1(\Lambda), (\tilde{\pi}_N^1 \varphi)(\zeta) = (\pi_N^{1,0} \tilde{\varphi})(\zeta) + \varphi(-1) \frac{1-\zeta}{2} + \varphi(1) \frac{1+\zeta}{2}, \quad (4.25)$$

where the function $\tilde{\varphi}$ stands for

$$\tilde{\varphi}(\zeta) = \varphi(\zeta) - \varphi(-1) \frac{1-\zeta}{2} - \varphi(1) \frac{1+\zeta}{2}.$$

Note that the definition of $\tilde{\pi}_N^1$ is available, because $\tilde{\varphi}$ belongs to $H_0^1(\Lambda)$, and that $\pi_N^{1,0} \tilde{\varphi}$ and φ coincide in -1 and 1 . In [8, Section 7], the following estimate is proven, for all $r \geq 1$ and all function φ in $H^r(\Lambda)$:

$$|\varphi - \tilde{\pi}_N^1 \varphi|_{1,\Lambda} + N\|\varphi - \tilde{\pi}_N^1 \varphi\|_{0,\Lambda} \leq cN^{1-r}\|\varphi\|_{r,\Lambda}. \quad (4.26)$$

Assuming $s \geq 1$, we set

$$R_{N-1}(\mathbf{u}) = \operatorname{curl}(\tilde{\pi}_{N-1}^{1(x)} \circ \tilde{\pi}_{N-1}^{1(y)} \psi).$$

Since $(\tilde{\pi}_{N-1}^{1(x)} \circ \tilde{\pi}_{N-1}^{1(y)} \psi)|_{\Gamma^1} = \psi|_{\Gamma^1} = 0$, we can verify that $R_{N-1}(\mathbf{u})$ belongs to V_N and, in view of (4.26), that

$$\|\varphi - \tilde{\pi}_{N-1}^{1(x)} \circ \tilde{\pi}_{N-1}^{1(y)} \psi\|_{H^1(\Omega)} \leq cN^{-s}\|\psi\|_{H^{s+1}(\Omega)}.$$

Finally, we derive, for $s \geq 1$,

$$\inf_{\mathbf{w}_N \in V_N} \|\mathbf{u} - \mathbf{w}_N\|_{L^2(\Omega)^2} \leq \|\mathbf{u} - R_{N-1}(\mathbf{u})\|_{L^2(\Omega)^2} \leq cN^{-s}\|\mathbf{u}\|_{H^s(\Omega)^2}.$$

Since we have $\inf_{\mathbf{w}_N \in V_N} \|\mathbf{u} - \mathbf{w}_N\|_{L^2(\Omega)^2} \leq c\|\mathbf{u}\|_{L^2(\Omega)^2}$, an interpolation argument gives the result of approximation in V_N for any $s \geq 0$ and the estimate of the theorem follows. \diamond

Third spectral discretization

The third discretization comes from the variational formulation (3.13), (3.14). We define the space X_N by

$$X_N = \mathbb{P}_N(\Omega)^2 \cap X = \{\mathbf{v}_N \in \mathbb{P}_N(\Omega)^2; \mathbf{v}_N \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma^1} = 0\}.$$

Let M_N be a subspace of $\mathbb{P}_N(\Omega)$ that we shall set later. Then, we consider the following discrete problem:

Find \mathbf{u}_N in X_N and p_N in M_N such that

$$\forall \mathbf{v}_N \in X_N, \quad (\mathbf{u}_N, \mathbf{v}_N)_N + b_N^*(\mathbf{v}_N, p_N) = (\mathbf{f}, \mathbf{v}_N)_N, \quad (4.27)$$

$$\forall q_N \in M_N, \quad b_N^*(\mathbf{u}_N, q_N) = 0, \quad (4.28)$$

where the form b_N^* is define by

$$\forall \mathbf{v}_N \in \mathbb{P}_N(\Omega)^2, \forall q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega), b_N^*(\mathbf{v}_N, q_N) = -(\operatorname{div} \mathbf{v}_N, q_N)_N. \tag{4.29}$$

In order to choose M_N , we begin to identify the spurious modes for the pressure. These spurious modes for the pressure are derived by elimination from those of classic Stokes problem (see [7, Chap. IV]). In particular, we can verify: $\forall \mathbf{v}_N \in X_N, b_N^*(\mathbf{v}_N, q_N) = 0$, for $q_N(x, y) = L_N(x)$ or $L_N(x)L_N(y)$. We obtain the following lemma.

Lemma 4.8 *Let \mathcal{Z}_N^* be the space*

$$\mathcal{Z}_N^* = \{q_N \in \mathbb{P}_N(\Omega); \forall \mathbf{v}_N \in X_N, b_N^*(\mathbf{v}_N, q_N) = 0\}.$$

Then \mathcal{Z}_N^ is spanned by $(L_N(x), L_N(x)L_N(y))$.*

Finally, let M_N stand for the orthogonal complement of \mathcal{Z}_N^* for the scalar product in $L^2(\Omega)$ or for the scalar product $(\cdot, \cdot)_N$, owing to (2.11). The inf-sup condition is given in the next lemma.

Lemma 4.9 *There exists a constant $c > 0$ independent from N such that*

$$\forall q_N \in M_N, \sup_{\mathbf{v}_N \in X_N} \frac{b_N^*(\mathbf{v}_N, q_N)}{\|\mathbf{v}_N\|_{H(\operatorname{div}; \Omega)}} \geq c \|q_N\|_{L^2(\Omega)}. \tag{4.30}$$

Proof. Any function q_N in M_N has the expansion

$$\begin{aligned} q_N(x, y) &= \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} q_{m,n} L_m(x) L_n(y) \\ &+ \sum_{m=0}^{N-1} q_{m,N} L_m(x) (L_N(y) - L_{N-2}(y)) + \sum_{n=1}^{N-1} q_{N,n} (L_N(x) - L_{N-2}(x)) L_n(y). \end{aligned}$$

With the convention $L_{-1} = 0$, we choose $\mathbf{w}_N = (w_N, z_N)$ with

$$\begin{aligned} w_N(x, y) &= - \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^m q_{m,n} \frac{L_{m+1}(x) - L_{m-1}(x)}{2m+1} L_n(y) \\ &- \sum_{m=0}^{N-1} q_{m,N} \frac{L_{m+1}(x) - L_{m-1}(x)}{2m+1} (L_N(y) - L_{N-2}(y)) \end{aligned} \tag{4.31}$$

and

$$\begin{aligned} z_N(x, y) &= - \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=m+1}^{N-1} q_{m,n} L_m(x) \frac{L_{n+1}(y) - L_{n-1}(y)}{2n+1} \\ &- \sum_{n=1}^{N-1} q_{N,n} (L_N(x) - L_{N-2}(x)) \frac{L_{n+1}(y) - L_{n-1}(y)}{2n+1}. \end{aligned} \tag{4.32}$$

Then, in view of (2.8), we have

$$\operatorname{div} \mathbf{w}_N = -q_N \quad \text{and} \quad \mathbf{w}_N \in X_N, \tag{4.33}$$

since $\mathbf{w}_N \cdot \mathbf{n}_{|\Gamma^1} = z_N|_{\Gamma^1} = 0$. As in [6, Chap. IV], we prove

$$\begin{aligned} \|q_N\|_{L^2(\Omega)}^2 &\geq c \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} q_{m,n}^2 \frac{1}{(m+\frac{1}{2})(n+\frac{1}{2})} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{N+\frac{1}{2}} \left(\sum_{m=0}^{N-1} q_{m,N}^2 \frac{1}{m+\frac{1}{2}} + \sum_{n=1}^{N-1} q_{N,n}^2 \frac{1}{n+\frac{1}{2}} \right) \right). \end{aligned} \tag{4.34}$$

Hence, we derive, in the same way as in [8, Section 24]



$$\left\| \frac{\partial w_N}{\partial x} \right\|_{L^2(\Omega)} + \left\| \frac{\partial z_N}{\partial y} \right\|_{L^2(\Omega)} \leq c \|q_N\|_{L^2(\Omega)}. \quad (4.35)$$

Next, setting $w_N^*(x, y) = w_N(x, y) - q_{0,0}L_1(x) - q_{0,N}L_1(x)(L_N(y) - L_{N-2}(y))$, we note that $w_N^*(\pm 1, y) = 0$ for $-1 \leq y \leq 1$. Then, the Poincaré-Friedrichs inequality, applied with respect to x or y , yields

$$\|w_N^*\|_{L^2(\Omega)} \leq c \left\| \frac{\partial w_N^*}{\partial x} \right\|_{L^2(\Omega)} \quad \text{and} \quad \|z_N\|_{L^2(\Omega)} \leq c \left\| \frac{\partial z_N}{\partial y} \right\|_{L^2(\Omega)}.$$

Hence, owing to (4.35) and the estimate

$$\sqrt{q_{0,0}^2 + \frac{q_{0,N}^2}{N + \frac{1}{2}}} \leq c \|q_N\|_{L^2(\Omega)},$$

which is derived from (4.34), we obtain

$$\|w_N\|_{L^2(\Omega)} + \|z_N\|_{L^2(\Omega)} \leq c \|q_N\|_{L^2(\Omega)}. \quad (4.36)$$

Finally (4.35) and (4.36) imply

$$\|\mathbf{w}_N\|_{H(\text{div};\Omega)} \leq c \|q_N\|_{L^2(\Omega)}$$

and, in view of (4.33), the choice $\mathbf{v}_N = \mathbf{w}_N$ in $b_N^*(\mathbf{v}_N, q_N)$ is available and gives the inf-sup condition (4.30). \diamond

From the previous lemma, we derive the following theorem.

Theorem 4.10 *Let \mathbf{f} be in $C^0(\bar{\Omega})^2$. Then problem (4.27), (4.28) has a unique solution (\mathbf{u}_N, p_N) satisfying*

$$\|\mathbf{u}_N\|_{H(\text{div};\Omega)} + \|p_N\|_{L^2(\Omega)} \leq C \|\mathcal{I}_N \mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)^2}. \quad (4.37)$$

Sketch of the proof. From (4.27), we derive $(\mathbf{u}_N, \mathbf{u}_N)_N = (\mathcal{I}_N \mathbf{f}, \mathbf{u}_N)_N$. Then, Owing to $\text{div } \mathbf{u}_N = 0$ and (2.13), we derive $\|\mathbf{u}_N\|_{H(\text{div};\Omega)} \leq 3 \|\mathcal{I}_N \mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)}$. Next, the inf-sup condition (4.30) and (4.27) imply

$$\|p_N\|_{L^2(\Omega)} \leq \frac{1}{c} \sup_{\mathbf{v}_N \in \mathcal{X}_N} \frac{b_N^*(\mathbf{v}_N, p_N)}{\|\mathbf{v}_N\|_{H(\text{div};\Omega)}} \leq \frac{1}{c} \sup_{\mathbf{v}_N \in \mathcal{X}_N} \frac{(\mathcal{I}_N \mathbf{f}, \mathbf{v}_N)_N - (\mathbf{u}_N, \mathbf{v}_N)_N}{\|\mathbf{v}_N\|_{H(\text{div};\Omega)}}.$$

Hence, in view of (2.13), we obtain

$$\|p_N\|_{L^2(\Omega)} \leq \frac{18}{c} \|\mathcal{I}_N \mathbf{f}\|_{L^2(\Omega)},$$

which ends the proof. \diamond

Next, in the same way as in Theorem 4.2, we prove an optimal error estimate.

Theorem 4.11 *Assume that the solution (\mathbf{u}, p) of problem (4.27), (4.28) belongs to $H^s(\Omega)^2 \times H^s(\Omega)$, $s \geq 0$, and the data \mathbf{f} belongs to $H^\sigma(\Omega)^2$, $\sigma > 1$. Then, the following estimate holds*

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \|p - p_N\|_{L^2(\Omega)} \leq c \left(N^{-s} (\|\mathbf{u}\|_{H^s(\Omega)^2} + \|p\|_{H^s(\Omega)}) + N^{-\sigma} \|\mathbf{f}\|_{H^\sigma(\Omega)^2} \right). \quad (4.38)$$

Sketch of the proof. Again, from the abstract error estimate for the approximation of saddle-point problems (see [7, Chap. IV]), we derive the following estimate:

$$\begin{aligned} & \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \|p - p_N\|_{L^2(\Omega)} \leq c \left(\inf_{\mathbf{w}_N \in V_N} \|\mathbf{u} - \mathbf{w}_N\|_{L^2(\Omega)^2} \right. \\ & + \inf_{\mathbf{v}_N \in \mathcal{X}_N} (\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2} + \sup_{\mathbf{z}_N \in \mathcal{X}_N} \frac{\int_{\Omega} \mathbf{v}_N(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{z}_N(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} - (\mathbf{v}_N, \mathbf{z}_N)_N}{\|\mathbf{z}_N\|_{L^2(\Omega)^2}} \\ & + \inf_{q_N \in M_N} (\|p - q_N\|_{L^2(\Omega)} + \sup_{\mathbf{z}_N \in \mathcal{X}_N} \frac{b^*(\mathbf{z}_N, q_N) - b_N^*(\mathbf{z}_N, q_N)}{\|\mathbf{z}_N\|_{L^2(\Omega)^2}}) \\ & \left. + \sup_{\mathbf{z}_N \in \mathcal{X}_N} \frac{\int_{\Omega} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{z}_N(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} - (\mathbf{f}, \mathbf{z}_N)_N}{\|\mathbf{z}_N\|_{L^2(\Omega)^2}} \right), \quad (4.39) \end{aligned}$$

where V_N is defined by

$$V_N = \{\mathbf{w}_N \in X_N; \forall q_N \in M_N, b_N^*(\mathbf{w}_N, q_N) = 0\}.$$

Moreover, we still have (see [11, CH. II, (1.16)])

$$\inf_{\mathbf{w}_N \in V_N} \|\mathbf{u} - \mathbf{w}_N\|_{L^2(\Omega)^2} \leq \frac{c}{\gamma} \inf_{\mathbf{v}_N \in X_N} (\|\mathbf{u} - \mathbf{v}_N\|_{L^2(\Omega)^2}).$$

We end the proof in the same way as in Theorem 4.2. ◇

Remark 4.12 *As for the first discretization, problem (4.27), (4.28) can be interpreted as a collocation scheme. In the same way, we prove that (4.27), (4.28) is equivalent to the set of equations for \mathbf{u}_N in X_N and p_N in M_N :*

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_N(\mathbf{x}) + \nabla p_N(\mathbf{x}) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}), & \forall \mathbf{x} \in \Xi_N \cap \Omega, \\ \frac{2}{N(N+1)} ((\mathbf{u}_N \cdot \mathbf{n})(\mathbf{x}) + \frac{\partial p_N}{\partial n}(\mathbf{x})) &= (\mathbf{f} \cdot \mathbf{n})(\mathbf{x}), & \forall \mathbf{x} \in \Xi_N \cap \Gamma^2, \\ \operatorname{div} \mathbf{u}_N(\mathbf{x}) &= 0, & \forall \mathbf{x} \in \Xi_N. \end{aligned}$$

Therefore, the discrete solution \mathbf{u}_N is exactly divergence-free, which is important for some applications.

NUMERICAL RESULTS

The convergence of the methods corresponding to the first and third discretizations were tested in a problem of the type (1.1)-(1.4), with homogeneous boundary conditions. Precisely, we tested the convergence of these methods to the exact solution $\mathbf{u}(x, y) = (\pi x^2 \cos(\pi y), -2x \sin(\pi y))$ and $p(x, y) = y \sin(\pi x)$, which means that we studied the convergence of these methods for Problem (1.1)-(1.4), with

$$\mathbf{f}(x, y) = (\pi x^2 \cos(\pi y) + \pi y \cos(\pi x), -2x \sin(\pi y) + \sin(\pi x))$$

and homogeneous boundary conditions. In addition, we tested the convergence to 0 of the divergence for both methods.

We shall use the Lagrange polynomials. We denote l_r the Lagrange polynomial associated to the Gauss-Lobatto point $\xi_r, 0 \leq r \leq N$, the expression of which is

$$l_r(x) = \frac{\prod_{j=0, j \neq r}^N (x - \xi_j)}{\prod_{j=0, j \neq r}^N (\xi_r - \xi_j)}. \tag{5.1}$$

The derivative l'_r verifies the following equalities

$$\forall r = 0, \dots, N, \forall m = 0, \dots, N, r \neq m, l'_r(\xi_m) = \frac{\prod_{j=0, j \neq m}^N (\xi_m - \xi_j)}{\prod_{j=0, j \neq r}^N (\xi_r - \xi_j)} \left(\frac{1}{\xi_m - \xi_r} \right), \tag{5.2}$$

$$\forall r = 0, \dots, N, l'_r(\xi_r) = \sum_{j=0, j \neq r}^N \frac{1}{\xi_r - \xi_j}. \tag{5.3}$$

Uzawa's algorithm

Problem (4.3), (4.4), Problem (4.13), (4.14) and Problem (4.27), (4.28) are equivalent to a linear system of the type :



$$\begin{cases} MU + DP = MF, \\ D^T U = 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

The unknowns are the vectors U and P which represent respectively the velocity and the pressure values on a given grid points. The data f is represented by the vector F on the same grid points. The diagonal matrix M is the weight matrix, while the matrix D is associated to the form b_N for the first and second spectral discretizations and to the form b_N^* for the third spectral discretization and D^T is the transposed matrix of D .

Uzawa's algorithm consists in rewriting the first equation of system (5.4) as: $U = F - M^{-1}DP$ and substituting in the second equation. We obtain a new equation for the pressure P :

$$(D^T M^{-1} D)P = D^T F. \quad (5.5)$$

Next, we solve this symmetric system either directly if the matrix $D^T M^{-1} D$ is invertible or by diagonalizing the matrix $D^T M^{-1} D$ if not, because the spurious modes correspond to eigenvalues of the matrix equal to zero. Next, we compute the velocity via the formula

$$U = F - M^{-1}DP$$

and its divergence by multiplying U on the left by the matrix D^T . Finally, we test the convergence to 0 of its divergence.

Implementation of the rst discretization

We take $(l_j(x)l_k(y), 0)$, $(0, l_j(x)l_k(y))$, $0 \leq i, j \leq N$ as a basis of X_N and $l_r(x)l_s(y)$, $1 \leq r \leq N - 1$, $0 \leq s \leq N$ as a basis of $P_N(\Omega) \cap M$. The unknowns are the velocity $\mathbf{u}_N = (u_N^1, u_N^2)$ and the pressure p_N . For $j = 1, 2$, for $0 \leq r, s \leq N$, we denote $U_{r,s}^{j,N} = u_N^j(\xi_r, \xi_s)$, $F_{r,s}^{j,N} = f_j(\xi_r, \xi_s)$, where $\mathbf{f} = (f_1, f_2)$ represents the data, and, for $1 \leq r \leq N - 1$, for $0 \leq s \leq N$, we denote $P_{r,s}^N = p_N(\xi_r, \xi_s)$. So, we have

$$u_N^j(x, y) = \sum_{r,s=0}^N U_{r,s}^{j,N} l_r(x) l_s(y), \quad j = 1, 2 \quad \text{and} \quad p_N(x, y) = \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{s=0}^N P_{r,s}^N l_r(x) l_s(y). \quad (5.6)$$

Let us define the $(N + 1)^2 \times (N + 1)^2$ diagonal matrix $\tilde{M} = (m_{(j,k),(r,s)})_{0 \leq j,k,r,s \leq N}$ with

$$m_{(j,k),(r,s)} = \begin{cases} 0 & \text{if } (r, s) \neq (j, k) \\ \rho_j \rho_k & \text{if } (r, s) = (j, k), \end{cases} \quad (5.7)$$

and the $2(N + 1)^2 \times 2(N + 1)^2$ diagonal matrix

$$M = \begin{pmatrix} \tilde{M} & 0 \\ 0 & \tilde{M} \end{pmatrix}.$$

By setting $\mathbf{v}_N(x, y) = (l_j(x)l_k(y), 0)$, for $0 \leq j, k \leq N$ and, next, $\mathbf{v}_N(x, y) = (0, l_j(x)l_k(y))$ in (4.3), (4.4), we obtain the matrix system (5.4) where the column matrices U , P and F are defined by

$$U = \begin{pmatrix} U_{j,k}^{1,N} \\ U_{j,k}^{2,N} \end{pmatrix}, \quad P = (P_{r,s}^N) \quad \text{and} \quad F = \begin{pmatrix} F_{j,k}^{1,N} \\ F_{j,k}^{2,N} \end{pmatrix}, \quad 0 \leq j, k, s \leq N, \quad 1 \leq r \leq N - 1,$$

and, with $(\cdot, \cdot)_N$ defined by (4.1), the $2(N + 1)^2 \times (N^2 - 1)$ matrix D by

$$D = \begin{pmatrix} D^{1,N} \\ D^{2,N} \end{pmatrix} \quad \text{with} \quad D^{1,N} = ((l_j(x)l_k(y), l'_r(x)l_s(y))_N), \quad D^{2,N} = ((l_j(x)l_k(y), l_r(x)l'_s(y))_N),$$

where (j, k) represents the row index, (r, s) the column index, $0 \leq i, j, s \leq N$, $1 \leq r \leq N - 1$, for the matrices $D^{1,N}$ and $D^{2,N}$. Note that U and F are $2(N + 1)^2 \times 1$ matrices and P is a $(N^2 - 1) \times 1$ matrix.

Proposition 5.1 *The $(N^2 - 1) \times (N^2 - 1)$ square matrix $D^T M^{-1} D$ is invertible.*

Proof. We just have to prove that the rank of the matrix D is $N^2 - 1$. Let us assume that the rank of the matrix D is strictly smaller than $N^2 - 1$. Then, there exist a sequence of real number $(q_{r,s}), 1 \leq r \leq N - 1, 0 \leq s \leq N$, where all the real numbers $q_{r,s}$ are not equal to zero, such that

$$\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{s=0}^N q_{r,s} D_{r,s} = 0,$$

where $D_{r,s}$ are the column vectors of the matrix D . Setting $q = \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{s=0}^N q_{r,s} l_r(x) l_s(y)$, the previous equality is equivalent to

$$\forall \mathbf{v}_N \in X_N, b(\mathbf{v}_N, q) = 0,$$

which is in contradiction with the property that there is no spurious mode. \diamond

We have to compute the matrix $D^T M^{-1} D = (b_{(t,u),(r,s)}), 1 \leq r, t \leq N - 1, 0 \leq s, u \leq N$. Owing to the previous expression of the matrices D and M , we obtain

$$b_{(t,u),(r,s)} = \sum_{m,k=0}^N \frac{1}{\rho_m \rho_k} (l_m(x) l_k(y), l'_t(x) l_u(y))_N (l_m(x) l_k(y), l'_r(x) l_s(y))_N + \sum_{m,k=0}^N \frac{1}{\rho_m \rho_k} (l_m(x) l_k(y), l_t(x) l'_u(y))_N (l_m(x) l_k(y), l_r(x) l'_s(y))_N.$$

Next, we change the numbering for the matrix $D^T M^{-1} D$. Let us define the mapping φ by

$$\forall (r, s), 1 \leq r \leq N - 1, 0 \leq s \leq N, \varphi(r, s) = 1 + (r - 1)(N + 1) + s. \tag{5.8}$$

Note that φ is a one to one mapping from $\{1, \dots, N - 1\} \times \{0, \dots, N\}$ to $\{1, \dots, N^2 - 1\}$ and we note

$$\forall 1 \leq i \leq N^2 - 1, \varphi^{-1}(i) = (\psi_1(i), \psi_2(i)). \tag{5.9}$$

Note that $\psi_1(i) - 1$ and $\psi_2(i)$ are respectively the quotient and the remainder of the euclidian division of $i - 1$ by $N + 1$. Then, we can denote

$$D^T M^{-1} D = (a_{i,j})_{1 \leq i,j \leq N^2 - 1} \text{ with } a_{i,j} = b_{(t,u),(r,s)}, \tag{5.10}$$

where $(t, u) = (\psi_1(i), \psi_2(i))$ and $(r, s) = (\psi_1(j), \psi_2(j))$.

Computing the elements $a_{i,j}$ of the matrix $D^T M^{-1} D$ yields

1) if $\psi_1(i) \neq \psi_1(j)$ and $\psi_2(i) \neq \psi_2(j)$

$$a_{i,j} = 0$$

2) if $\psi_1(i) \neq \psi_1(j)$ and $\psi_2(i) = \psi_2(j)$

$$a_{i,j} = \rho_{\psi_2(i)} \sum_{m=0}^N \rho_m l'_{\psi_1(i)}(\xi_m) l'_{\psi_1(j)}(\xi_m)$$

3) if $\psi_1(i) = \psi_1(j)$ and $\psi_2(i) \neq \psi_2(j)$

$$a_{i,j} = \rho_{\psi_1(i)} \sum_{m=0}^N \rho_m l'_{\psi_2(i)}(\xi_m) l'_{\psi_2(j)}(\xi_m)$$

4) if $\psi_1(i) = \psi_1(j)$ and $\psi_2(i) = \psi_2(j)$, that is to say $i=j$

$$a_{i,i} = \rho_{\psi_2(i)} \sum_{m=0}^N \rho_m (l'_{\psi_1(i)})^2 + \rho_{\psi_1(i)} \sum_{m=0}^N \rho_m (l'_{\psi_2(i)})^2.$$

Thus, most of elements of the matrix $D^T M^{-1} D$ are equal to zero.

Next, we determine the column matrix $D^T F = (c_{i,1})$ by

$$\forall 1 \leq i \leq N^2 - 1, c_{i,1} = \rho_{\psi_2(i)} \sum_{m=0}^N \rho_m l'_{\psi_1(i)}(\xi_m) F_{m,\psi_2(i)}^{1,N} + \rho_{\psi_1(i)} \sum_{m=0}^N \rho_m l'_{\psi_2(i)}(\xi_m) F_{\psi_1(i),m}^{2,N}.$$

Hence, owing to (5.2) and (5.3), we compute the list $[l'_k(\xi_m), 0 \leq k, m \leq N]$, which allows us to determine the elements of the matrices $D^T M^{-1} D$ and $D^T F$. Since the matrix $D^T M^{-1} D$ is invertible, the equation $(D^T M^{-1} D)X = D^T F$ has a unique solution X . Then



we derive easily the column matrix $P = (P_{r,s}^N)$ such that $P_{r,s}^N = X_{\varphi(r,s)}$, $1 \leq r \leq N-1$, $0 \leq s \leq N$ and, next, the column matrix U , thanks to the relation $U = F - M^{-1}DP$. Setting $P_{0,t}^N = P_{N,t}^N = 0$ for $0 \leq t \leq N$ in accordance with the boundary conditions, we obtain

$$U_{m,k}^{1,N} = F_{m,k}^{1,N} - \sum_{u=1}^{N-1} l'_u(\xi_m) P_{u,k}^N, \quad U_{m,k}^{2,N} = F_{m,k}^{2,N} - \sum_{t=0}^N l'_t(\xi_k) P_{m,t}^N.$$

Finally, we derive

$$\begin{aligned} (\operatorname{div} \mathbf{u}_N, \operatorname{div} \mathbf{u}_N)_N &= \sum_{i,j=0}^N \rho_i \rho_j \left(\sum_{m=0}^N (U_{m,j}^{1,N} l'_m(\xi_i) + U_{i,m}^{2,N} l'_m(\xi_j)) \right)^2, \\ (\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)_N &= \sum_{i,j=0}^N \rho_i \rho_j (u_1(\xi_i, \xi_j) - U_{i,j}^{1,N})^2 + (u_2(\xi_i, \xi_j) - U_{i,j}^{2,N})^2, \\ (p - p_N, p - p_N)_N &= \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=0}^N \rho_i \rho_j (p(\xi_i, \xi_j) - P_{i,j}^N)^2. \end{aligned}$$

We give the values of $(\operatorname{div} \mathbf{u}_N, \operatorname{div} \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$, $(p - p_N, p - p_N)_N^{\frac{1}{2}}$ and $(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$ for N between 4 and 21.

TABLE 4.1

N	4	5	6	7	8	9
$(\operatorname{div} \mathbf{u}_N, \operatorname{div} \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$	6,85	0,27	1,12	0,0155	0,080	$5,16 \cdot 10^{-4}$
$(p - p_N, p - p_N)_N^{\frac{1}{2}}$	0,06	0,02	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$7,75 \cdot 10^{-4}$	$7,59 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$
$(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$	1,07	0,045	0,010	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$4,65 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-5}$
N	10	11	12	13	14	15
$(\operatorname{div} \mathbf{u}_N, \operatorname{div} \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$7,86 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,92 \cdot 10^{-9}$
$(p - p_N, p - p_N)_N^{\frac{1}{2}}$	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$	$1,96 \cdot 10^{-8}$	$3,27 \cdot 10^{-9}$	$2,03 \cdot 10^{-10}$	$2,97 \cdot 10^{-11}$
$(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$6,62 \cdot 10^{-9}$	$3,54 \cdot 10^{-8}$	$6,03 \cdot 10^{-11}$
N	16	17	18	19	20	21
$(\operatorname{div} \mathbf{u}_N, \operatorname{div} \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$	$1,73 \cdot 10^{-8}$	$1,68 \cdot 10^{-11}$	$1,69 \cdot 10^{-10}$	$1,02 \cdot 10^{-12}$	$3,79 \cdot 10^{-12}$	$1,91 \cdot 10^{-11}$
$(p - p_N, p - p_N)_N^{\frac{1}{2}}$	$1,64 \cdot 10^{-12}$	$2,15 \cdot 10^{-13}$	$1,06 \cdot 10^{-14}$	$5,50 \cdot 10^{-15}$	$1,09 \cdot 10^{-14}$	$1,06 \cdot 10^{-14}$
$(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$	$3,70 \cdot 10^{-10}$	$4,37 \cdot 10^{-13}$	$3,03 \cdot 10^{-12}$	$3,03 \cdot 10^{-14}$	$9,03 \cdot 10^{-14}$	$2,69 \cdot 10^{-13}$

We shall comment these results on comparing them with these ones of the third discretization.

Implementation of the first discretization

We only sketch the method because the first and third discretizations are rather similar, but we shall point out the differences between both discretizations.

First, the space X_N is not the same, because boundary conditions are taken in account. Thus, we take $(l_j(x)l_k(y), 0)$, $(0, l_s(x)l_r(y))$, $0 \leq i, j, s \leq N$, $1 \leq r \leq N-1$ as a basis of X_N .

Second, we shall compute the pressure p_N as the orthogonal projection on M_N of an element of $\mathbb{P}_N(\Omega)$ and we take $l_r(x)l_s(y)$, $0 \leq r, s \leq N$ as a basis of $\mathbb{P}_N(\Omega)$. For $0 \leq r, s \leq N$, we denote $U_{r,s}^{1,N} = u_N^1(\xi_r, \xi_s)$, $P_{r,s}^N = p_N(\xi_r, \xi_s)$ and for $0 \leq r \leq N$, $1 \leq s \leq N-1$, we denote $U_{r,s}^{2,N} = u_N^2(\xi_r, \xi_s)$. Let us define the matrix $\tilde{M}_1 = \tilde{M}$, where \tilde{M} is given by (5.7), the $(N^2 - 1) \times (N^2 - 1)$ matrix $\tilde{M}_2 = (m_{(j,k),(r,s)})$ with

$$m_{(j,k),(r,s)} = \begin{cases} 0 & \text{if } (r, s) \neq (j, k) \\ \rho_j \rho_k & \text{if } (r, s) = (j, k), \end{cases} \quad 0 \leq j, r \leq N, \quad 1 \leq k, s \leq N - 1$$

and the $2N(N + 1) \times 2N(N + 1)$ diagonal matrix

$$M_* = \begin{pmatrix} \tilde{M}_1 & 0 \\ 0 & \tilde{M}_2 \end{pmatrix}.$$

In the same way as the first discretization, we derive the following matrix system

$$\begin{cases} M_*U + D_*P = M_*F, \\ D_*^T U = 0 \end{cases}, \tag{5.11}$$

where the column matrices U, P and F are defined by

$$U = \begin{pmatrix} U_{j,k}^{1,N} \\ U_{t,u}^{2,N} \end{pmatrix}, \quad P = (P_{r,s}^N) \text{ and } F = \begin{pmatrix} F_{j,k}^{1,N} \\ F_{t,u}^{2,N} \end{pmatrix}, \quad 0 \leq j, k, r, s, t \leq N, \quad 1 \leq u \leq N - 1$$

and the $2N(N + 1) \times (N + 1)^2$ matrix D_* by

$$D_* = \begin{pmatrix} D_*^{1,N} \\ D_*^{2,N} \end{pmatrix} \text{ with } D_*^{1,N} = -(l'_j(x)l_k(y), l_r(x)l_s(y))_N, \quad D_*^{2,N} = -(l_t(x)l'_u(y), l_r(x)l_s(y))_N.$$

We have to compute the matrix $D_*^T M_*^{-1} D_* = (b_{(t,u),(r,s)}^*, 0 \leq r, s, t, u \leq N)$. In the same way as the first discretization, we obtain

$$b_{(t,u),(r,s)}^* = \sum_{m,k=0}^N \frac{1}{\rho_m \rho_k} (l'_m(x)l_k(y), l_t(x)l_u(y))_N (l'_m(x)l_k(y), l_r(x)l_s(y))_N \\ + \sum_{m=0}^N \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{\rho_m \rho_k} (l_m(x)l'_k(y), l_t(x)l_u(y))_N (l_m(x)l'_k(y), l_r(x)l_s(y))_N.$$

Next, as in the first discretization, we change the numbering for the matrix $D_*^T M_*^{-1} D_*$. Let us define the mapping φ_* by

$$\forall (r, s), \quad 0 \leq r, s \leq N, \quad \varphi_*(r, s) = r(N + 1) + s + 1. \tag{5.12}$$

Note that φ_* is a one to one mapping from $\{0, \dots, N\}^2$ to $\{1, \dots, (N + 1)^2\}$ and we note

$$\forall 1 \leq i \leq N^2 - 1, \quad \varphi_*^{-1}(i) = (\psi_1^*(i), \psi_2^*(i)). \tag{5.13}$$

Note that $\psi_1^*(i)$ and $\psi_2^*(i)$ are respectively the quotient and the remainder of the euclidian division of $i - 1$ by $N + 1$. Then, we can denote

$$D_*^T M_*^{-1} D_* = (a_{i,j}^*)_{1 \leq i,j \leq (N+1)^2} \text{ with } a_{i,j}^* = b_{(t,u),(r,s)}^*, \tag{5.14}$$

where $(t, u) = (\psi_1^*(i), \psi_2^*(i))$ and $(r, s) = (\psi_1^*(j), \psi_2^*(j))$.

Computing the elements $a_{i,j}^*$ of the matrix $D_*^T M_*^{-1} D_*$ yields

- 1) if $\psi_1^*(i) \neq \psi_1^*(j)$ and $\psi_2^*(i) \neq \psi_2^*(j)$
 $a_{i,j}^* = 0$
- 2) if $\psi_1^*(i) \neq \psi_1^*(j)$ and $\psi_2^*(i) = \psi_2^*(j)$
 $a_{i,j}^* = \rho_{\psi_1^*(i)} \rho_{\psi_1^*(j)} \rho_{\psi_2^*(i)} \sum_{m=0}^N \frac{1}{\rho_m} l'_m(\xi_{\psi_1^*(i)}) l'_m(\xi_{\psi_1^*(j)})$
- 3) if $\psi_1^*(i) = \psi_1^*(j)$ and $\psi_2^*(i) \neq \psi_2^*(j)$
 $a_{i,j}^* = \rho_{\psi_2^*(i)} \rho_{\psi_2^*(j)} \rho_{\psi_1^*(i)} \sum_{m=1}^{N-1} \frac{1}{\rho_m} l'_m(\xi_{\psi_2^*(i)}) l'_m(\xi_{\psi_2^*(j)})$
- 4) if $\psi_1^*(i) = \psi_1^*(j)$ and $\psi_2^*(i) = \psi_2^*(j)$, that is to say $i=j$
 $a_{i,i}^* = (\rho_{\psi_1^*(i)})^2 \rho_{\psi_2^*(i)} \sum_{m=0}^N \frac{1}{\rho_m} (l'_m(\xi_{\psi_1^*(i)}))^2 + (\rho_{\psi_2^*(i)})^2 \rho_{\psi_1^*(i)} \sum_{m=1}^{N-1} \frac{1}{\rho_m} (l'_m(\xi_{\psi_2^*(i)}))^2$
 zero.



Next, we determine the column matrix $D_*^T F = (c_{i,1}^*)$ by

$$\forall 1 \leq i \leq (N+1)^2, c_{i,1}^* = -\rho_{\psi_1(i)} \rho_{\psi_2(i)} \left(\sum_{m=0}^N l'_m(\xi_{\psi_1^*(i)}) F_{m,\psi_2(i)}^{1,N} + \sum_{m=1}^{N-1} l'_k(\xi_{\psi_2^*(i)}) F_{\psi_1(i),m}^{2,N} \right).$$

Now, we deal with the main difference between both discretizations. In the third discretization, the matrix $D_*^T M_*^{-1} D_*$ is not invertible and the computation of the pressure is more complicated. First, let $q_N = \sum_{t,u=0}^N q_{t,u} l_t(x) l_u(y)$ be a spurious mode, that is to say an element of the space \mathcal{Z}_N^* defined in Lemma 4.8. In the same way as in the proof of Proposition 5.1, considering that the matrices $D_*^T M_*^{-1} D_*$ and D_* have the same rank, we obtain the following equivalences

$$q_N \in \mathcal{Z}_N^* \iff D_* Q = 0 \iff (D_*^T M_*^{-1} D_*) Q = 0,$$

where Q is the column vector $(q_{t,u})_{0 \leq t,u \leq N}$. We can consider the matrix $D_*^T M_*^{-1} D_*$ as the matrix of a linear mapping f from the vector space $\mathbb{P}_N(\Omega)$ into itself equipped with the basis $\mathcal{B} = (l_i(x) l_j(y))_{0 \leq i,j \leq N}$. Therefore, \mathcal{Z}_N^* is the eigenspace associated to the eigenvalue equal to 0 of the linear mapping f or, equivalently, of its matrix $D_*^T M_*^{-1} D_*$. Note that this basis is orthonormal for the scalar product $(\cdot, \cdot)_N$. We can diagonalize the positive symmetric matrix $D_*^T M_*^{-1} D_*$ and, thus, there exist a diagonal matrix Λ and an orthogonal matrix R such that $D_*^T M_*^{-1} D_* = R \Lambda R^{-1}$ and such that the diagonal elements of Λ , that is to say $(\lambda_{i,i})_{1 \leq i \leq (N+1)^2}$ are in increasing order. Note that the matrix Λ is the matrix of f in a basis $\mathcal{B}' = (h_i)_{1 \leq i \leq (N+1)^2}$ of $\mathbb{P}_N(\Omega)$, which is orthonormal for the scalar product $(\cdot, \cdot)_N$, the elements of which are the eigenvectors of the matrix $D_*^T M_*^{-1} D_*$. Let P' be the column matrix the elements of which are the components of the pressure p_N in the new basis \mathcal{B}' of $\mathbb{P}_N(\Omega)$. We have $P' = R^T P = R^{-1} P$ and the following equivalence

$$(D_*^T M_*^{-1} D_*) P = D_*^T F \iff \Lambda P' = R^T D_*^T F. \tag{5.15}$$

Since \mathcal{Z}_N^* is a two dimensions space, $\mathcal{B}'_0 = (h_1, h_2)$ is the basis of \mathcal{Z}_N^* and $(h_i)_{3 \leq i \leq (N+1)^2}$ is a basis of $M_N = (\mathcal{Z}_N^*)^\perp$. Therefore, we determine the column vectors P' and P by

$$P'_1 = P'_2 = 0, P'_i = \frac{1}{\lambda_{i,i}} (R^T D_*^T F)_i, 3 \leq i \leq (N+1)^2 \text{ and } P = R P', \tag{5.16}$$

and we have $P_{r,s}^N = P \varphi_{*(r,s)}$, $0 \leq r, s \leq N$. In the same way as for the first discretization, we derive the column matrix U by the relation $U = F - M_*^{-1} D_* P$, which gives, for

$$0 \leq j, k, t \leq N, 1 \leq u \leq N-1,$$

$$U_{j,k}^{1,N} = F_{j,k}^{1,N} + \frac{1}{\rho_j} \sum_{r=0}^N \rho_r l'_j(\xi_r) P_{r,k}^N, U_{t,u}^{2,N} = F_{t,u}^{2,N} + \frac{1}{\rho_u} \sum_{r=0}^N \rho_r l'_u(\xi_r) P_{t,r}^N.$$

Finally, considering the boundary conditions, we set $U_{t,0}^{2,N} = U_{t,N}^{2,N} = 0$, $0 \leq t \leq N$, and we obtain the same formulas as in the first discretization for $(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)_N$, $(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)_N$ and $(p - p_N, p - p_N)_N$. We also give the values of $(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)_{\frac{1}{N}}$, $(p - p_N, p - p_N)_{\frac{1}{N}}$ and $(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)_{\frac{1}{N}}$ for N between 4 and 21.

TABLE 4.2

N	4	5	6	7	8	9
$(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)^{\frac{1}{2}}_N$	$1,84.10^{-16}$	$5,45.10^{-15}$	$3,60.10^{-16}$	$3,05.10^{-15}$	$8,76.10^{-16}$	$1,94.10^{-14}$
$(p - p_N, p - p_N)^{\frac{1}{3}}_N$	0,246	0,016	0,019	0,0039	$8,43.10^{-4}$	$1,55.10^{-3}$
$(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)^{\frac{1}{2}}_N$	0,62	0,043	0,054	$1,54.10^{-3}$	$2,48.10^{-3}$	$3,54.10^{-5}$

N	10	11	12	13	14	15
$(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)^{\frac{1}{2}}_N$	$1,24.10^{-14}$	$9,28.10^{-15}$	$2,7.10^{-13}$	$9,68.10^{-13}$	$4,25.10^{-13}$	$3,43.10^{-13}$
$(p - p_N, p - p_N)^{\frac{1}{3}}_N$	$2,3.10^{-5}$	$8,25.10^{-4}$	$4,33.10^{-7}$	$4,8.10^{-4}$	$5,9.10^{-9}$	$3,1.10^{-4}$
$(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)^{\frac{1}{2}}_N$	$7,0.10^{-5}$	$5,7.10^{-7}$	$1,34.10^{-6}$	$6,79.10^{-9}$	$1,85.10^{-8}$	$6,23.10^{-11}$

N	16	17	18	19	20	21
$(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)^{\frac{1}{2}}_N$	$4,38.10^{-13}$	$2,24.10^{-12}$	$3,59.10^{-13}$	$1,9.10^{-12}$	$8,71.10^{-13}$	$2,68.10^{-12}$
$(p - p_N, p - p_N)^{\frac{1}{3}}_N$	$6,11.10^{-11}$	$2,05.10^{-4}$	$4,96.10^{-13}$	$1,44.10^{-4}$	$3,24.10^{-14}$	$1,04.10^{-4}$
$(\mathbf{u} - \mathbf{u}_N, \mathbf{u} - \mathbf{u}_N)^{\frac{1}{2}}_N$	$1,93.10^{-10}$	$4,53.10^{-13}$	$1,57.10^{-12}$	$3,66.10^{-14}$	$1,12.10^{-13}$	$2,38.10^{-13}$

Logarithm to the basis 10 of $(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)^{\frac{1}{2}}_N$
 in function of N for the first and third discretizations

First discretization: — Third discretization: —

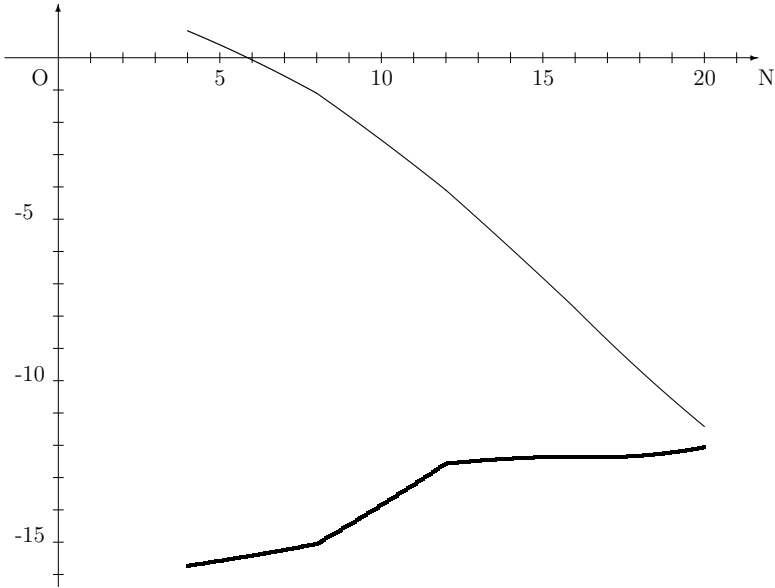


FIGURE 4.3



CONCLUSION

Continuous problem and discretizations

We studied the Darcy problem by defining two equivalent variational formulations corresponding to two different bilinear forms b and b^* . The first one requests a more regular pressure, which is bounded in $H^1(\Omega)$. The second one is less classic and was introduced by A. Quarteroni and A. Valli (see [14]). This second variational formulation is important because it allowed us to construct a spectral method which gives a divergence-free discrete solution.

Moreover, by studying a mixed problem of Dirichlet-Neumann for the Laplace operator, we proved regularity results with the solution (\mathbf{u}, p) in $H^1(\Omega)^2 \times H^2(\Omega)$ as long as the data is regular enough.

The first variational formulation led us to two spectral discretizations. In the first one, the discrete solution is not divergence-free, which is a disadvantage for some applications. However, we obtain a fully optimal error estimate for the velocity and the pressure. In the second discretization, it does not appear spurious modes for the pressure. Moreover, because of the exactness of the quadrature formulas, the error estimate is easier to obtain. However, the error estimate for the pressure is not optimal, because the inf-sup constant depends on N .

The second variational formulation led to a third spectral discretization. There are spurious modes, which complicate the study, but the discrete velocity is divergence-free, which is important when the system is a stage of solving of a time-dependent problem, and the error estimate for the velocity and the pressure is fully optimal. In conclusion, this third discretization is the best discretization and we will only use it hereafter.

Comparison of both spectral discretizations

Tables 4.1 and 4.2 test the convergence of respectively the first and third discretizations to the exact solutions. For the first discretization, we see the convergence to zero of $(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$, about 10^{-1} for $N = 8$ and about 10^{-12} for $N = 19$. Concerning the third discretization, we see that the quantity $(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$ is very small for all values of N , about 10^{-16} for $N = 4$ and about 10^{-12} for $N = 20$. Thus, we verify that, in the third discretization, the discrete solution \mathbf{u}_N is exactly divergence-free, which is important, as we saw previously. This property appears clearly in Figure 4.3, which represents the logarithm to the basis 10 of the quantity $(\text{div } \mathbf{u}_N, \text{div } \mathbf{u}_N)_N^{\frac{1}{2}}$ as a function of N , for even N from 4 to 20, for both discretizations.

Regarding the velocity, the discrete solution \mathbf{u}_N converges fast to the exact solution \mathbf{u} for both discretizations. For the pressure, we also obtain fast convergence, except for odd N in the third discretization.

REFERENCES

- [1] Achdou, Y., Bernardi, C., and Coquel, F. (2003). A priori and a posteriori analysis of finite volume discretizations of Darcy's equations. *Numerische Mathematik*, 96(1), 17-42.
- [2] Azaïez, M., Bernardi, C., and Grundmann, M. (1994). Méthodes spectrales pour les équations du milieu poreux. *East-West J. Numer. Math.*, 2, 91-105.
- [3] Babuška, I. (1973). The finite element method with Lagrangian multipliers. *Numerische Mathematik*, 20(3), 179-192.
- [4] Begue, C., Conca, C., Murat, F., and Pironneau, O. (1988). Les équations de Stokes et de Navier-Stokes avec des conditions aux limites sur la pression. In *Nonlinear partial differential equations and their applications, Collège de France Seminar*, 9, 79-264.
- [5] Bernard, J. M. (2004). Spectral discretizations of the Stokes equations with non-standard boundary conditions. *Journal of Scientific Computing*, 20(3), 355-377.
- [6] Bernardi, C., Canuto, C., and Maday, Y. (1991). Spectral approximations of the Stokes equations with boundary conditions on the pressure. *SIAM journal on numerical analysis*, 28(2), 333-362.
- [7] Bernardi, C., and Maday, Y. (1992). *Approximations spectrales de problèmes aux limites elliptiques*. Paris, Francia: Springer-Verlag.
- [8] Bernardi, C., and Maday, Y. (1997). Spectral methods. *Handbook of numerical analysis*, 5, 209-485.
- [9] Brezzi, F. (1974). On the existence, uniqueness and approximation of saddle-point problems arising from Lagrangian multipliers. *Publications mathématiques et informatique de Rennes*, (S4), 1-26.
- [10] Chorin, A. J. (1968). Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Mathematics of computation*, 22(104), 745-762.
- [11] Girault, V. & Raviart, P. A. (1986). *Finite Element Methods for Navier-Stokes Equations*. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- [12] Grisvard, P. (1985). *Elliptic Problems in Non-Smooth Domains*. Boston, United States of America: Pitman Monographs and Studies in Mathematics.
- [13] Necas, J. (1967). *Les méthodes directes en théorie des équations elliptiques*. Paris, France: Masson.
- [14] Quarteroni, A. & Valli, A. (1999). *Domain decomposition methods for partial differential equations*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- [15] Temam, R. (1968). Une méthode d'approximation de la solution des équations de Navier-Stokes. *Bulletin de la Société Mathématique de France*, 96, 115-152. doi: <https://doi.org/10.24033/bsmf.1662>

Ranas terrestres en los ecosistemas surandinos de Ecuador IV: Una nueva especie de *Pristimantis* (Anura: Strabomantidae) de los páramos sur del Parque Nacional Sangay

Salomón M. Ramírez-Jaramillo¹, Carolina Reyes-Puig^{1,2*}, Diego Batallas^{1,3}, Mario H. Yáñez-Muñoz¹

¹Instituto Nacional de Biodiversidad, Rumipamba 341 y Av. de los Shyris, Casilla 17-07-8976. Quito, Ecuador

²Instituto de Zoología Terrestre, Museo de Zoología, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales COCIBA, Quito 170901, Ecuador

³Fundación Naturaleza Kakaram, calle Santa Rosa 158 BL B Dep 2. Casilla postal 17-07-9920, Quito-Ecuador

*Autor para correspondencia / Corresponding author, e-mail: creyesp@usfq.edu.ec

Terrestrial frogs in the south Andean ecosystems of Ecuador IV: A new species of *Pristimantis* (Anura: Strabomantidae) of the southern paramos of Sangay National Park

Abstract

We describe a new species of terrestrial frog of the genus *Pristimantis*, located in the south Andes of Ecuador. The new species is characterized by: presence of dentigerous processes of vomer that are triangular in outline; ulnar tubercles flattened and disposed in a longitudinal, fold-like row; and a distinctive ventral coloration light to dark brown with white warts. We describe the call of an adult male, a single note with an average frequency of 4.23 kHz and two partial harmonics, and an average duration of 207 ms.

Keywords: Cañar, Culebrillas lagoon, *Pristimantis caniari* sp. nov., south Andes

Resumen

Describimos una nueva especie de rana terrestre *Pristimantis* de los Andes sur de Ecuador. La nueva especie se caracteriza por la presencia de procesos dentígeros del vómer de contorno triangular; tubérculos ulnares aplanados, dispuestos en una hilera a manera de pliegue; y una distintiva coloración ventral de café claro a café oscuro con verrugas pigmentadas de blanco. Su canto presenta una única nota con frecuencia dominante promedio de 4.23 kHz y dos parciales armónicos, y una duración promedio de 207 ms.

Palabras clave: Cañar, Laguna de Culebrillas, *Pristimantis caniari* sp. nov., Andes sur

INTRODUCCIÓN

El género *Pristimantis* constituye el grupo de anfibios terrestres más diverso en el Neotrópico [1-3], con 207 y 201 especies formalmente descritas, Colombia y Ecuador son los países con mayor riqueza del género [3-4]. Las recientes descripciones de *Pristimantis* en el territorio ecuatoriano [5-9], han acrecentado significativamente el número de especies, así, en los últimos dos años se han descrito más de 15 especies nuevas [5-13]. La alta riqueza de ranas terrestres en Ecuador es también acompañada de un alto porcentaje de endemismo (i.e. 54%) [4], la mayoría de especies endémicas se restringen a las estribaciones de los Andes ecuatorianos [4], reflejando a los ecosistemas andinos como hábitats idóneos para las ranas *Pristimantis* [1,4,14].

Los páramos y estribaciones del Centro Sur del Ecuador han sido consideradas zonas poco exploradas y su estudio durante la última década ha arrojado el descubrimiento de varias especies nuevas [5-8,12-13,15-20], de las cuales tres han sido reportadas en las tierras altas y paramunas de la región (i.e. *Pristimantis mazar*, *P. bambu*, *P. gulacenio*) [18-20]. En este artículo describimos una nueva especie de los páramos de la región, cuya morfología externa es similar a las especies del grupo de *Pristimantis orcesi* (*sensu* Hedges et al. [2]), además incluimos un análisis de las variables espectrales y temporales de su canto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis morfológico: la descripción de la especie sigue el estándar de Lynch y Duellman [1] y el uso de los caracteres diagnósticos hace referencia a las definiciones e ilustraciones propuestas por Duellman y Lehr [21]. Utilizamos la propuesta de Heinicke et al. [22] para la clasificación sistemática de familia y seguimos los grupos putativos de especies propuestos por Hedges et al. [2] y Padial et al. [23]. Los especímenes colectados fueron sacrificados en una solución de benzocaína, fijados en formalina al 10% y preservados en etanol al 70%. El sexo y edad de los especímenes fueron determinados mediante la identificación de características sexuales secundarias (almohadillas nupciales, hendiduras bucales en los machos y tamaño corporal) e inspección directa de las gónadas a través de incisiones dorsolaterales. Las medidas morfométricas fueron tomadas con un calibrador electrónico (precisión ± 0.01 mm, aproximados a 0.1 mm) siguiendo los comentarios de Duellman y Lehr [21]. Los patrones de coloración en vida fueron extraídos de las notas de campo y fotografías a color. Las coordenadas y elevación de la localidad tipo fueron determinadas en base a las coordenadas registradas con un GPS y las notas de campo del colector. En todo el texto se hacen uso de las siguientes abreviaciones para los créditos fotográficos e información asociada: Salomón Ramírez Jaramillo (SRJ), Carolina Reyes-Puig (CRP) y Mario H. Yáñez-Muñoz (MYM).

Los especímenes examinados están depositados en el repositorio de Herpetología del Instituto Nacional de Biodiversidad, Quito (DHMECN), Instituto de Ciencias Naturales (ICN) Universidad Nacional de Colombia, y Colección Herpetológica de la Universidad del Valle del Cauca (UVC). Excepto por las series tipo, los siguientes especímenes fueron examinados:



ECUADOR: *Pristimantis orcesi*: Tungurahua: Parque Nacional Llanganates, 3510m, DHMECN 1820-1823; Napo: Papallacta, 3910m, DHMECN 1857-1866; Napo: Cuyuja, 3591m, DHMECN 2903. *Pristimantis ortizi*: Carchi: Julio Andrade - Ipueran, 3420m, DHMECN 2277; Carchi: Laguna de Maicas, 3443m, DHMECN 9346; Sucumbíos: La bonita, 2614m, DHMECN 6389-6390; *Pristimantis riveti*: Chimborazo: Parque Nacional Sangay - Lagunas Negras, 3600m, DHMECN 1849-1851; Azuay: Molleturo, 3600m, DHMECN 3084; Azuay: Gualaceo - Bosque Aguarongo, 3132m, DHMECN 11877-11878. *Pristimantis thymelensis*: Carchi: Reserva Ecológica El Ángel, 3900m, DHMECN 1867-1890; Carchi: Lagunas del Voladero, 3420m, DHMECN 2415-2419; Napo: Papallacta, 3910m, DHMECN 1856. **COLOMBIA:** *Pristimantis obmutescens*: Departamento del Cauca: Páramo de Puracé, alrededores de la Laguna San Rafael, ICN 2087, holotipo. *Pristimantis racemus*: Departamento del Valle del Cauca, Tenerife, UVC 8131, 8193. *Pristimantis simoteriscus*: Departamento del Tolima: Municipio de Cajamarca, Páramo de los Valles, SW of Anaime, Anaime-Santa Helena road, ICN 22835, holotipo. *Pristimantis simoterus*: Departamento del Tolima: Páramo de Letras, páramo-subpáramo, vereda Albania, Municipio de Herveo, ICN 759, hembra, holotipo.

Análisis bioacústico: los cantos se registraron con una grabadora digital Olympus WS-750, conectada a un sistema modular Sennheiser K6-C, acoplado a un micrófono de cabezal Sennheiser ME 66, tomando la temperatura y humedad con un termómetro ambiental marca Springfield. Para los análisis acústicos se utilizó el programa Adobe Audition 3.0 a una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz y 16 "bits" de resolución [24]; para construir el oscilograma y sonograma se utilizó el programa Raven 1.4 [25] a 256 puntos de resolución de la transformación rápida de Fourier (FFT). Las grabaciones fueron obtenidas el 26 junio 2009 a las 19h55 por SRJ a una temperatura de 3,3° C y 91% de humedad relativa correspondiente al ejemplar DHMECN 10341. Las variables analizadas fueron: (1) Frecuencia dominante: frecuencia de mayor energía medida a lo largo de todo el canto; (2) Frecuencias armónicas: frecuencias más altas que son múltiplo de la frecuencia fundamental; (3) cantos/minuto: repetición de los cantos en el lapso de un minuto; (4) Notas canto: número de unidades acústicas de un determinado patrón de amplitud reconocido en los cantos; (5) Duración de los cantos: tiempo desde el inicio hasta el final de un canto, medido con el analizador de forma de onda, (6) Intervalos entre cantos: tiempo transcurrido entre canto y canto. Las definiciones y mediciones realizadas en las variables acústicas se basaron en los términos propuestos por Duellman y Pyles [26], Cocroft y Ryan [27]; Angulo et al. [28]; Díaz y Cádiz [29] y Batallas y Brito [24].

RESULTADOS

Pristimantis caniari sp. nov.

Fig. 1-4

Holotipo: DHMECN 10341, macho adulto, colectado en Chacapata, cerca de la Laguna de Culebrillas, Parque Nacional Sangay, (2.404824°S, 78.833850°W, 3920 m; Datum WGS84; Fig. 5), parroquia Juncal, cantón Cañar, provincia de Cañar, República del Ecuador, el 27 de junio del 2009, por Salomón Ramírez Jaramillo.

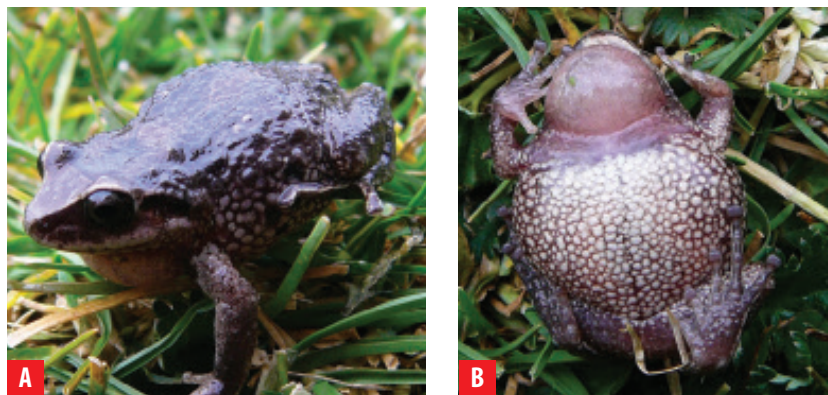


FIGURA 1. *Pristimantis caniari* sp. nov. DHMECN 10341, macho, holotipo (LRC = 24,4 mm).
A Coloración dorsal en vida; **B** Coloración ventral en vida. Fotografías: Salomón M. Ramírez-Jaramillo.

Paratopotipos: DHMECN 10342-10345 machos adultos con los mismos datos del holotipo.

Etimología: El epíteto específico “*caniari*” es utilizado como sustantivo en aposición, y hace alusión al pueblo y cultura Cañari. Los Cañaris fueron antiguos habitantes en las tierras frías de páramo en las provincias de Cañar y Azuay. El nombre rinde honor a esta cultura andina, cuyas creencias y tradiciones aún prevalecen en el tiempo.

Nombre común sugerido: Cutín Cañari

Nombre común en inglés sugerido: Cañari Robber Frog

Asignación genérica: Asignamos a la nueva especie dentro del género *Pristimantis* por presentar cabeza tan ancha como el cuerpo; membrana timpánica diferenciada, crestas craneales ausente; procesos dentígeros del vómer presentes; condición “S” del músculo aductor; discos terminales en los dígitos expandidos; con surcos circummarginales bien definidos y falanges terminales en forma de “T”; dedo I de la mano más corto que el dedo II; de V más largo que el dedo III; tubérculos subarticulares no proyectados hacia afuera; textura de la piel del dorso variable; vientre areolado [2].

Diagnos: *Pristimantis caniari* se distingue de sus congéneres por la siguiente combinación de caracteres: (1) textura de la piel dorso y flancos finamente granular con distintivas verrugas aplanadas, con una hilera de verrugas aplanadas dispuestas paravertebralmente, pliegues dorsolaterales ausentes, piel del vientre fuertemente areolada; piel de la región internasal lisa; pliegue discoidal débilmente definido; (2) membrana y anillo timpánico presente, equivalente al el 56% del diámetro del ojo, redondo; en contacto con un pliegue supratimpánico prominente; (3) hocico corto, redondeado en vista dorsal y de perfil; (4) párpado superior con uno a dos tubérculos redondeados pequeños, más estrecho que la distancia interorbital, cresta craneal ausente; (5) procesos dentígeros del vómer de contorno triangular, con 4 a 7 dientes; (6) machos con hendiduras bucales sublinguales, saco gular y almohadillas nupciales presentes; (7) dedo I de la mano más corto que el dedo II; discos ligeramente más anchos que los dígitos, levemente truncados



de los dedos II al IV; (8) dedos de la mano con rebordes cutáneos laterales presentes; (9) tubérculos ulnares presentes, aplanados, dispuestos en una hilera longitudinal a manera de pliegue; (10) talón con varios tubérculos redondeados, borde externo del tarso con verrugas aplanadas; pliegue tarsal interno presente, se extiende a las $\frac{3}{4}$ partes del tarso; (11) tubérculo metatarsal interno ovalado, 2-3 veces el tamaño del tubérculo metatarsal externo, redondeado; tubérculos supernumerarios presentes; (12) dedos del pie con rebordes cutáneos laterales; sin membranas interdigitales; dedo V más largo que el dedo III y no se extiende más allá del tubérculo subarticular distal del dedo IV; discos del mismo tamaño que los discos de la mano; (13) coloración dorsal desde café claro, café oscuro a gris oscuro, con manchas café oscuras, negras o blancas; flancos homogéneamente café con verrugas blancas a crema (blancas en vida); garganta y vientre en fondo café claro hasta café oscuro con distintivas verrugas pigmentadas de blanco; línea labial completa o interrumpida de color crema; superficies ocultas de las ingles con coloración café claro (rojizo en vida), iris dorado con finas reticulaciones negras; (14) longitud rostro-cloacal en machos 24,1-24,9 mm ($l''=24,5$, $n=5$), hembras desconocidas.

Comparación con especies similares: Las principales diferencias con los miembros del grupo de *P. orcesi* (*sensu* Hedges et al. [2]) se resumen en el Tabla 3. En su morfología externa *Pristimantis caniari* es reminiscente a las especies del grupo de *P. orcesi*. Dentro del grupo de especies de *P. orcesi*, *P. obmutescens*, *P. racemus*, *P. simoteriscus* y *P. simoterus* (Fig. 6), distribuidas en la Cordillera Central de Colombia, pueden resultar similares a *P. caniari* (caracteres entre paréntesis) por la presencia de verrugas aplanadas en el dorso y por exhibir un vientre fuertemente areolado. Sin embargo, las cuatro especies muestran procesos dentígeros del vómer de contorno oblicuo (triangular) y coloración del vientre crema con reticulaciones café-rojizas a gris uniforme en *P. obmutescens*, blanco con puntos y reticulaciones café en *P. racemus*, café rojizo pálido en *P. simoterus* y café pálido en *P. simoteriscus* (café claro a café oscuro con distintivas verrugas pigmentadas de blanco); *P. obmutescens* presenta tímpano oculto detrás de la piel, ausencia de hendiduras bucales y saco gular, ausencia de almohadillas nupciales (todos los caracteres presentes); las hendiduras bucales, saco gular y almohadillas nupciales están ausentes en *P. racemus* (presentes); *P. simoterus* posee débiles crestas craneales (ausentes), ausencia de almohadillas nupciales (presentes), tubérculos ulnares ausentes (aplanados, dispuestos en una hilera longitudinal a manera de pliegue); *P. simoteriscus* presenta el párpado superior sin tubérculos (uno a dos redondeados, pequeños), ausencia de hendiduras bucales y almohadillas nupciales (presentes), tubérculos ulnares ausentes o pobremente definidos (aplanados, dispuestos en una hilera longitudinal a manera de pliegue).

Las especies ecuatorianas del grupo de *Pristimantis orcesi*: *P. orcesi*, *P. thymelensis*, y *P. ortizi* (Fig. 7) pueden ser semejantes a *P. caniari* (caracteres entre paréntesis). No obstante, *P. orcesi* se distingue por carecer de procesos dentígeros del vómer (presentes), tubérculos subarticulares redondeados, visibles y pronunciados (ligeramente elevados); discos digitales más anchos que los dígitos (ligeramente más anchos); tubérculos ulnares ausentes (presentes); tubérculo metatarsal interno 3-5 veces el tamaño del externo (2-3 veces); coloración dorsal en vida de café a negro con o sin verrugas blancas en los flancos, vientre café claro (dorso desde café oscuro, café con manchas blancas, hasta café chocolate; flancos homogéneamente café oscuros con verrugas blancas; garganta y vientre en fondo café claro hasta café oscuro con distintivas verrugas pigmentadas de blanco).

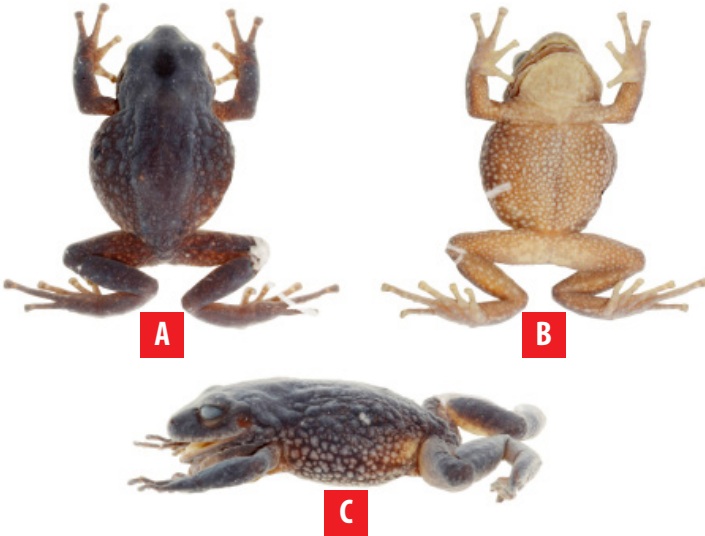


FIGURA 2. A vista dorsal. **B** vista ventral. **C** vista de perfil de *Pristimantis caniari* sp. nov., DHMECN 10341, macho, holotipo (LRC = 24,4 mm).

Pristimantis thymelensis se diferencia de *P. caniari* (caracteres entre paréntesis) por presentar el tímpano oculto bajo la piel (visible externamente); tubérculos en el párpado superior ausentes (uno a dos tubérculos pequeños redondeados); procesos dentígeros del vómer de contorno oblicuo (triangular); tubérculos ulnares prominentes (aplanados dispuestos en hilera longitudinal a manera de pliegue); tubérculo tarsal interno presente (pliegue tarsal interno); tarso con tubérculos redondeados (con verrugas aplanadas); tubérculo metatarsal interno 5-6 veces el tamaño del externo (2-3 veces); vientre gris cremoso a amarillo marrón y densamente reticulado con café o negro (café claro a café oscuro con distintivas verrugas pigmentadas de blanco). Por otro lado, *P. ortizi* se diferencia de la nueva especie por presentar la piel del dorso areolada (fuertemente areolada), procesos dentígeros del vómer ausentes o reducidos (presentes, triangulares), almohadillas nupciales ausentes (presentes), tubérculos ulnares usualmente ausentes, si presentes pequeños (aplanados, dispuestos en una hilera longitudinal a manera de pliegue); vientre blanco con motas café oscuras (café claro a café oscuro con distintivas verrugas pigmentadas de blanco).

Otra especie de los Andes centro-sur del Ecuador que comparte el carácter de verrugas aplanadas en el dorso y flancos es *P. riveti* (Fig. 7), sin embargo, se distingue de *P. caniari* por presentar pliegues dorsolaterales evidentes (ausentes); procesos dentígeros del vómer redondos (triangulares), tubérculos ulnares presentes, poco definidos (presentes, aplanados, dispuestos en una hilera longitudinal a manera de pliegue), tubérculo metatarsal externo cónico (redondeado), pliegue tarsal interno ausente (presente); saco gular en machos amarillo y vientre de blanco perla a rosa pálido con reticulaciones café (garganta y vientre en fondo café claro hasta café oscuro con distintivas verrugas pigmentadas de blanco).

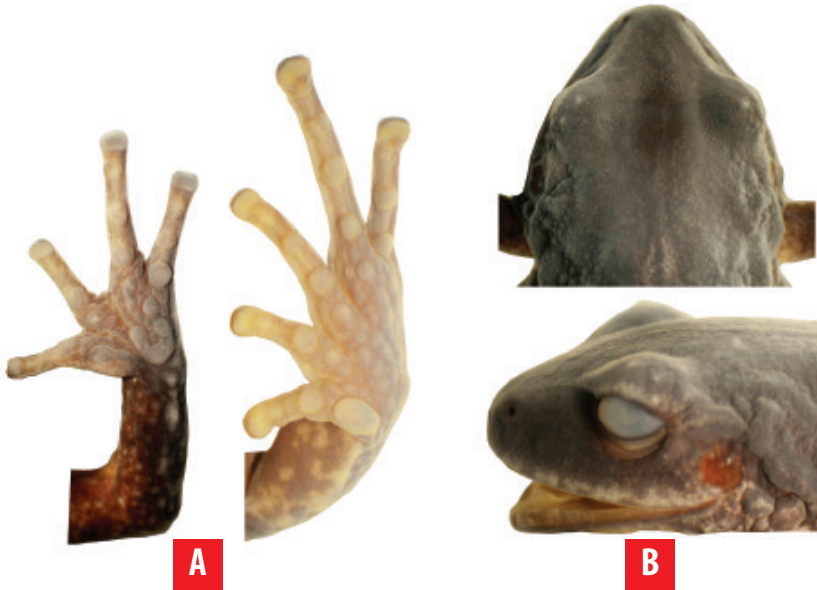


FIGURA 3. *Pristimantis canari* sp. nov. DHMECN 10341, macho, holotipo.
A Detalle de las extremidades; **B** Detalle de la cabeza en vista de dorsal y de perfil.

Descripción del holotipo: Macho adulto, cabeza más larga que ancha; hocico corto, redondeado en vista dorsal y de perfil (Fig. 3); distancia ojo-narina 13% de la LRC; canto rostral ligeramente cóncavo, narinas débilmente dirigidas lateralmente (Fig. 3); área interorbital ligeramente cóncava, más ancha que el párpado superior, equivalente al 62% de la distancia interorbital; cresta craneal ausente; párpado superior con uno a dos tubérculos redondeados pequeños (Fig. 3), párpado más angosto que el espacio interorbital; membrana timpánica diferenciada de la piel que la rodea, anillo timpánico evidente, redondo, margen superior en contacto con un pliegue supratimpánico grueso y verrugas aplanadas, tímpano visible parcialmente en visita dorsal, diámetro del tímpano 63% del diámetro del ojo, verrugas postrictales redondeadas presentes; coanas pequeñas, ovoides de contorno, no cubiertas por el piso palatal del maxilar; procesos dentígeros del vómer presentes, triangular de contorno con 5-6 dientes, ubicados posteriomedialmente en relación a las coanas; lengua más larga que ancha, ovalada, 40% adherida al piso palatal de la boca.

Textura de la piel en la región internasal lisa, dorso y flancos finamente granular con distintivas verrugas aplanadas, con una hilera de verrugas aplanadas dispuestas paravertebralmente, pliegues dorsolaterales ausentes, piel del vientre fuertemente areolada. Pliegue discoidal débilmente definido, cloaca rodeada por algunas verrugas redondeadas y aplanadas. Brazos esbeltos, tubérculos ulnares presentes, aplanados, dispuestos en una hilera longitudinal a manera de pliegue (Fig. 3); dedos con rebordes

cutáneos laterales, tubérculo palmar bifurcado, semejante a un corazón, tubérculo tenar ovalado (Fig. 3); tubérculos subarticulares redondos prominentes, tubérculos supernumerarios presentes, grandes y aplanados; almohadillas nupciales presentes, bien definidas, evidentes en el dedo I, terminaciones digitales ligeramente más anchas que los dígitos, discos definidos por surcos circunmarginales (Fig. 3).

Extremidades posteriores esbeltas; longitud de la tibia 41% de la longitud rostro-cloacal, talón con varios tubérculos redondeados, borde externo del tarso con verrugas aplanadas (Fig. 3); pliegue tarsal interno presente, se extiende a las $\frac{3}{4}$ partes del tarso (Fig. 3); dedos del pie con rebordes cutáneos laterales, pronunciados basalmente en todos los dedos; tubérculos subarticulares redondos, prominentes; tubérculo metatarsal interno ovalado, 3 veces del tubérculo metatarsal externo que es redondeado; tubérculos supernumerarios presentes, grandes y aplanados (Fig. 3); discos ligeramente más anchos que los dígitos; dedo V mayor al III, no se extiende más allá del tubérculo subarticular distal del dedo IV (Fig. 3).

Coloración en preservado del holotipo: Dorso uniformemente gris azulado; flancos e ingle café con verrugas aplanadas crema; garganta y vientre café, vientre con distintivas verrugas pigmentadas de blanco; débil línea supralabial crema; dorsalmente, extremidades anteriores de color gris azulado, bordes internos de la ulna y I a III dedo café; superficies posteriores y ocultas de las extremidades posteriores café (Fig. 2).

Coloración en vida: Dorsalmente café claro y oscuro a gris oscuro, con manchas café oscuras, negras o blancas; hocico siena brillante a café oscuro, franja supralabial crema con o sin interespacios oscuros; flancos en fondo café claro a oscuro con distintivas verrugas blancas; extremidades café claro y oscuro a gris oscuro con manchas irregulares café oscuras, negras o blancas, dígitos delineados de crema a siena brillante; vientre fondo café claro a oscuro, con distintivas verrugas blancas; garganta café claro a oscuro; ingle y superficies anteriores y posteriores de los muslos café rojizo; iris dorado con finas reticulaciones negras (Fig. 1).

Medidas del holotipo (mm): longitud rostro-cloacal = 24,4; distancia órbita-narina = 3,1; longitud cefálica = 10,3; ancho cefálico = 9,7; distancia interorbital = 3,5; distancia internarinal = 2,3; longitud de la tibia = 10,1; longitud del pie = 10,3; longitud de la mano = 6,9; diámetro horizontal del tímpano = 1,6; longitud horizontal del ojo = 2,6; ancho del párpado = 2,2.

Variación: Variaciones morfométricas de la serie tipo son presentadas en la Tabla 1. El espécimen DHMECN 10341 exhibe un patrón de coloración dorsal café, el espécimen DHMECN 10344 café claro con marcas longitudinales café oscuro, el paratopotipo DHMECN 10342 presenta una coloración dorsal gris azulado con distintivas marcas blancas, mientras que el ejemplar DHMECN 10345 muestra el dorso gris azulado con marcas gris claro en "A", el holotipo por su lado presenta un patrón uniforme gris azulado. Ventralmente los paratopotipos DHMECN 10341-10342, 10344 muestran distintivas verrugas pigmentadas de crema en fondo café claro, mientras que el holotipo y el paratopotipo DHMECN 10345 exhiben dichas verrugas en fondo café oscuro (Fig. 4).



FIGURA 4. Variación dorsal y ventral en la serie tipo de *Pristimantis canari* sp. nov. Primera y segunda fila de izquierda a derecha: DHMECN 10341, macho, holotipo (LRC = 24,4 mm); DHMECN 10342, macho, paratopotipo (LRC = 25,4 mm); DHMECN 10343, macho paratopotipo (LRC = 24,7 mm); DHMECN 10344, macho, paratopotipo (LRC = 25,2 mm); DHMECN 10345 macho, paratopotipo (LRC = 25,1 mm).

TABLA 1. Medidas morfométricas de la serie tipo de *Pristimantis canari* sp. nov. Rango de medidas (media \pm desviación estándar). DON = distancia órbita-narina; LC = longitud cefálica; AC= ancho cefálico; DIO= distancia interorbital; DIN= distancia internarinal; LT= longitud de la tibia; LP= longitud del pie; LM= longitud de la mano; DT= diámetro horizontal del tímpano; DO=; AP= ancho del párpado

	Machos n=5
LRC	24,1–24,9 (24,5 \pm 0,3)
ON	2,4– 3,1 (2,8 \pm 0,3)
LC	8,7–10,3 (9,5 \pm 0,6)
AC	9,7–9,2 (9,5 \pm 0,2)
DIO	3,2–3,7 (3,5 \pm 0,2)
DIN	2,2–2,7 (2,4 \pm 0,2)
LT	9,3–10,5 (10,0 \pm 0,5)
LP	9,8–11,1 (10,7 \pm 0,7)
LM	6,3– 7,8 (6,9 \pm 0,6)
DT	1,4–1,7 (1,6 \pm 0,1)
DO	2,6–3,1 (2,8 \pm 0,2)
AP	2,1–2,2 (2,5 \pm 0,04)

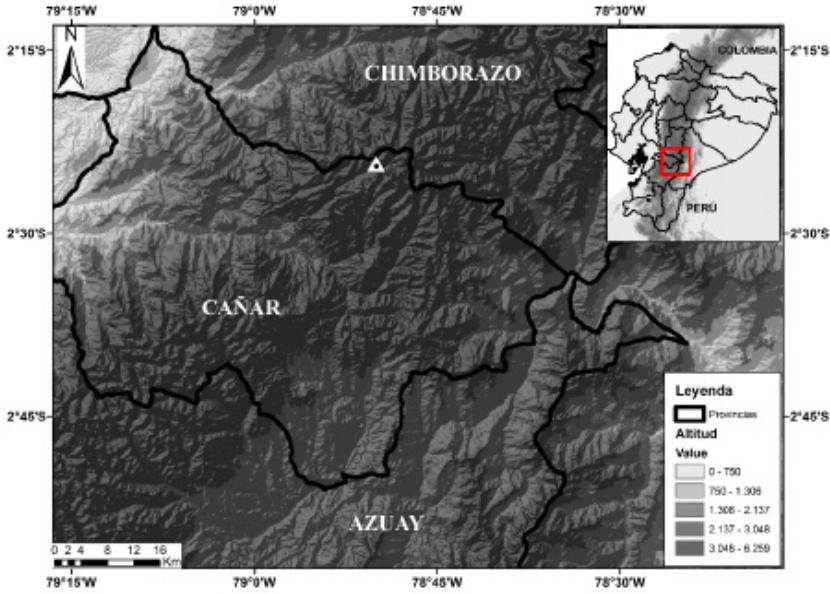


FIGURA 5. Mapa de la localidad tipo de *Pristimantis caniari* sp. nov., Chacapata (triángulo), Provincia de Cañar.

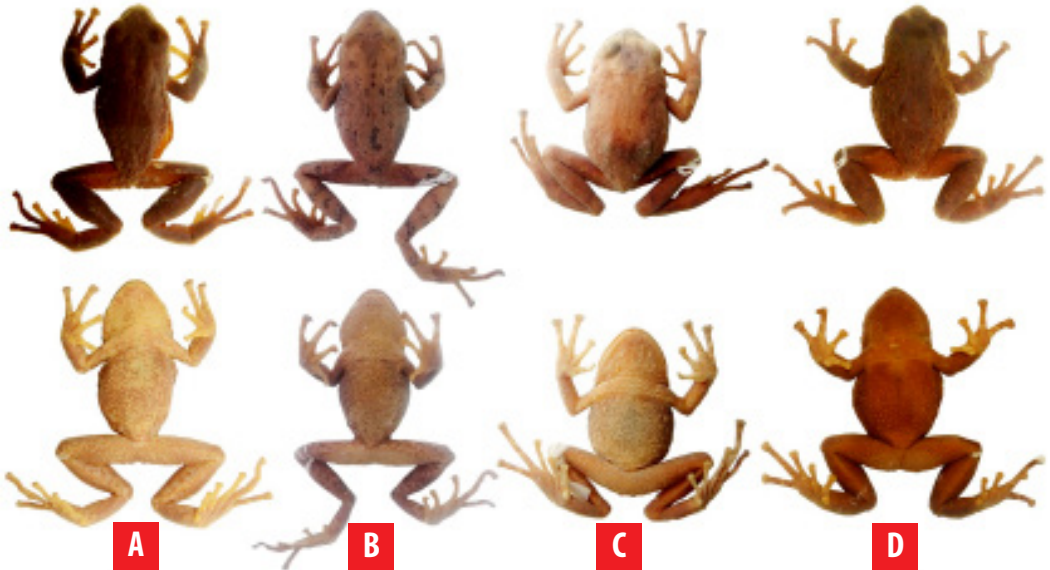


FIGURA 6. Especies colombianas del grupo de *Pristimantis orcesi* sensu Hedges et al. [2] similares a *P. caniari* sp. nov. **A** *Pristimantis obmutescens*, ICN 2087, hembra, holotipo (LRC = 31.9 mm); **B** *Pristimantis racemus*, UVC 8193, hembra (LRC = 33.6 mm); **C** *Pristimantis simoteriscus*, ICN 22835, hembra, holotipo (LRC = 30.1); **D** *Pristimantis simoteriscus*, ICN 759, hembra, holotipo (LRC = 37.1 mm).



FIGURA 7. Especies de *Pristimantis* similares a *P. caniari* sp. nov. **A** *Pristimantis orcesi*, DHMECN 2903, hembra (LRC = 37,6 mm); **B** *Pristimantis thymelensis* DHMECN1875, hembra (LRC = 29,19 mm); **C** *Pristimantis riveti*, DHMECN 3084 macho (LRC = 38,5 mm).

Bioacústica: *Pristimantis caniari* posee cantos compuestos de una sola nota, de frecuencia modulada, cuya frecuencia dominante es de $\bar{X}= 2,13 \pm 0,02$ kHz; presenta dos armónicos parciales, de los cuales el primero tiene una frecuencia de $\bar{X}= 4,2 \pm 0,06$ kHz y el segundo una frecuencia de $\bar{X}= 6,1 \pm 0,02$ kHz (Fig. 8). Los cantos tienen una duración de $\bar{X}= 207 \pm 9,4$ ms, con intervalos de $= 11057,6 \pm 3818,6$ ms, emitiendo $\bar{X}= 5,8 \pm 1,5$ cantos/minuto (Tabla. 2). Sus cantos son silbidos cortos, fuertes y medianamente agudos, propios de ranas terrestres *Pristimantis* de alturas, las vocalizaciones fueron emitidas desde pajonales en el páramo. Los cantos se escucharon a partir de las 18h20, incrementando su actividad a partir de las 19h00 hasta las 22h00, se escucharon vocalizaciones dispuestas en varios coros.

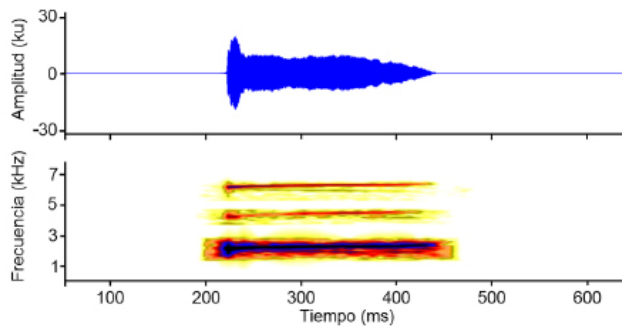


FIGURA 8. Oscilograma y espectrograma del canto de *Pristimantis caniari* sp. nov. Ejemplar DHMECN 10341.

TABLA 2. Resumen de los análisis acústicos de los cantos de *Pristimantis canari* sp. nov. macho, holotipo DHMECN 10341. De los valores calculados se detalla mínima, máxima, media y desviación estándar. Las abreviaciones utilizadas corresponden a: n= número de cantos analizados, kHz= Kilohercios, ms= milisegundos.

Parámetro	n=5
Frecuencia Dominante (kHz)	2,09–2,17 (2,13 ± 0,02)
1er Armónico (kHz)	4,16–4,35 (4,23 ± 0,06)
2do Armónico (kHz)	6,09–6,15 (6,13 ± 0,02)
Cantos/minuto	3,17–7,26 (5,75 ± 1,53)
Notas por Canto	1
Duración de los Cantos (ms)	191–219 (207 ± 9)
Intervalos entre Cantos (ms)	8060–18703 (11057,6 ± 381,9)

Distribución e historia natural: *Pristimantis canari* es conocido únicamente de su localidad tipo, en el ecosistema Herbazal de Páramo, piso bioclimático montano alto y montano alto superior [30], en la provincia de Cañar a 3920 m de elevación. La localidad se ubica en los páramos del piso zoogeográfico Altoandino [31]. Los especímenes fueron colectados en vegetación herbácea, dentro de pajonales (*Calamagrostis* sp.), entre 10-30 cm del suelo, se capturaron 5 individuos vocalizando durante la noche. Tres muestras fueron tomadas mediante frotis para detectar la presencia *Batrachochytrium dendrobatidis* según la técnica de Boyle [32], mostrando resultados negativos para el patógeno. Las principales amenazas observadas durante los días de muestreo fueron: la quema de páramo en ciertas épocas del año y el sobre pastoreo en la zona. Se identifican como sus potenciales depredadores a las aves rapaces *Falco* sp., *Phalcooenus carunculatus*, *Geranoetus melanogaster* (S. Ramírez-Jaramillo. com. pers. 2016).

DISCUSIÓN

Históricamente los especialistas de las ranas terrestres *Pristimantis* han usado los grupos o asambleas de especies como una propuesta preliminar y putativa para entender el componente filogenético del género [2, 33-35]. Sin embargo, la incertidumbre sobre las relaciones filogenéticas se mantiene para la mayoría de especies [23], debido a que la búsqueda de una congruencia de caracteres morfológicos diagnósticos, entre los grupos putativos y los resultados genéticos obtenidos en las filogenias propuestas por Hedges et al. [2], Pyron y Wiens [36], y Padial et al. [23] es todavía inconclusa. El uso de estas hipótesis puede proveer evidencias primarias que faciliten la confrontación de linajes morfológicamente similares. Consideramos que *Pristimantis canari* es reminiscente en su morfología externa a las especies de ranas terrestres del grupo de *P. orcesi* (*sensu* Hedges et al. [2]), por la presencia de las siguientes características: cuerpo robusto, cabeza estrecha, hocico corto, extremidades posteriores moderadamente pequeñas; I dedo de la mano más corto que el dedo II; dedo V del pie mucho más largo que el dedo III, extendiéndose al borde proximal del tubérculo subarticular del dedo IV; discos digitales expandidos; membrana y anillo timpánico diferenciados (ausente en *P. thymelensis*); cresta craneal ausente; hendiduras bucales presentes; procesos vomerinos odontóforos presentes (ausentes en *P. orcesi*) [2].



La validez del grupo de especies de *Pristimantis orcesi* es todavía incierto. Originalmente Lynch [34] reconoció al grupo como una asamblea de especies del grupo de *Pristimantis unistrigatus* asociando cinco especies (*P. obmutecens*, *P. orcesi*, *P. racemus*, *P. simoterus* y *P. thymelensis*) de la cordillera central de Colombia y los Andes norte de Ecuador. Posteriormente Lynch y Duellman [1] edificarían el grupo de especies de *P. orcesi*, asociándolo a la serie de especies de *P. martinicensis*, y más tarde Guayasamín [37], hipotetizó la monofilia del grupo con la sinapomorfia de reducción de fontanelas frontoparietales. Por otro lado, Hedges et al. [2] define el grupo y lo mantiene a pesar de que la evidencia filogenética con base molecular ha identificado la parafilia del grupo con muestras de tan solo dos de las ocho especies asignadas al grupo [2], y Padial et al. [23] asigna a todos los miembros del grupo de *P. orcesi* (*sensu* Hedges et al. [2]) dentro del género *Pristimantis* sin grupo de especies, basándose en la presencia de *P. thymelensis* junto a representantes del también parafilético grupo de *P. myersi*.

Por lo tanto, la ausencia de evidencias moleculares nos impide proponer con certeza que *P. caniari* presente relaciones de ancestro-descendencia con los congéneres del grupo de *P. orcesi*, ya que podría estar asociado a dos clados parafiléticos. No obstante, comparamos a la nueva especie con los miembros del grupo de *P. orcesi* (*sensu* Hedges et al. [2]), al ser el grupo de especies morfológicamente similar a *P. caniari*.

El canto de *P. caniari* presenta un silbido lánguido y melodioso cuyo patrón es comparable con los cantos de ciertas especies de las zonas alto andinas (e.g. grupo de especies *P. myersi* y *P. phoxocephalus*), diferenciando su sonoridad con los característicos “tics” metálicos de otros *Pristimantis* (sonoridad onomatopéyica muy común en zonas altas) (Batallas. com. pers. 2016). No existe una descripción formal del canto de especies afines a *P. caniari*, por lo tanto, desconocemos patrones acústicos de las especies asociadas a la nueva especie. La bioacústica en Ecuador se ha venido desarrollando de manera sigilosa, limitando sus estudios a complementar las descripciones de especies nuevas [12]. Es necesario acrecentar esfuerzos en el componente acústico de anuros, para de ese modo trabajar complementariamente con herramientas útiles, que permitan profundizar el estudio de relaciones filogenéticas de grupos conflictivos.

AGRADECIMIENTOS

Dejamos constancia de nuestro agradecimiento al Ministerio de Ambiente de Ecuador por facilitar el permiso de investigación N°001-09-IC-FAU-FLO-DNB-/MA para la colecta de especímenes. La revisión del material tipo de *Pristimantis* en Colombia, contó el apoyo económico del Jardín Botánico Basel a través de Heinz Schneider y de Lou Jost, Javier Robayo y Juan P. Reyes-Puig de Fundación Ecomiga. John D. Lynch y Raúl Sedano brindaron las mejores condiciones durante la visita de MYM a las colecciones del Instituto de Ciencias Naturales (ICN) de la Universidad de Colombia y la Colección Herpetológica de la Universidad del Valle del Cauca (UVC). El trabajo de los autores se enmarca en el Programa de Investigación Red Terrana del Ecuador, respaldado por el INABIO.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Salomón M. Ramírez-Jaramillo, Carolina Reyes-Puig, Diego Batallas y Mario H. Yáñez- Muñoz participaron en la colección y análisis de datos, la redacción del manuscrito y la revisión del artículo.

REFERENCIAS

- [1] Lynch, J. D., and Duellman, W. E. (1997). Frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in western Ecuador: systematic, ecology, and biogeography. *Natural History Museum, University of Kansas., Special Publication*, 23, 1–236. doi: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.7951>
- [2] Hedges, S. B., Duellman, W. E., & Heinicke, M. P. (2008). New World direct-developing frogs (Anura: Terrarana): molecular phylogeny, classification, biogeography, and conservation. *Zootaxa*, 1737(1), 1–182.
- [3] Frost, D. R. (2016). Amphibian Species of the World: an Online Reference. Versión 6.0. *American Museum of Natural History*. Recuperado de <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>
- [4] Ron, S. R., Guayasamin, J. M., Yáñez-Muñoz, M. H., y Merino-Viteri, A. O. (2016). DA & Nicolalde, DA 2016. *AmphibiaWebEcuador*. Version 2016.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- [5] Yáñez-Muñoz, M. H., Sánchez-Nivicela, J. C., & Reyes-Puig, C. (2016). Tres nuevas especies de ranas terrestres *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de la Provincia de El Oro, Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 8(1), 5–25. doi: <http://dx.doi.org/10.18272/aci.v8i1.455>
- [6] Brito, J., Ojala Barbour, R., Batallas D. & Almedáriz, A. (2016). A new species of *Pristimantis* (Amphibia: Strabomantidae) from the cloud forest of Sangay National Park, Ecuador. *Journal of Herpetology*, 50 (2), 337–344. doi: <https://doi.org/10.1670/13-103>
- [7] Navarrete, M. J., Venegas, P. & Ron, S. R. (2016). Two new species of frogs of the genus *Pristimantis* from Llanganates National Park in Ecuador with comments on the regional diversity of Ecuadorian *Pristimantis* (Anura, Craugastoridae). *ZooKeys*, 593, 139–162. doi: <https://doi.org/10.3897/zookeys.593.8063>
- [8] Reyes-Puig, J. P., Reyes-Puig, C., Pérez L., M. & Yáñez-Muñoz, M. H. (2015). Dos nuevas especies de ranas *Pristimantis* (Craugastoridae) de la cordillera de los Sacha Llanganatis, vertiente oriental de los Andes de Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7(2), B61–B74. doi: <http://doi.org/10.18272/aci.v7i2.258>
- [9] Yáñez-Muñoz, M. H., Reyes-Puig, C., Bejarano-Muñoz, P. & Ron, S. R. (2015). Otra nueva especie de *Pristimantis* (Anura: Terrarana) de las estribaciones occidentales del Volcán Pichincha, Ecuador. *ACI:Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7 (2), 52–60. doi: <http://doi.org/10.18272/aci.v7i2.257>
- [10] Arteaga, A. F., Pyron, R. A., Peñafiel, N., Romero-Barreto, P., Culebras, J., Bustamante, L. M., Yáñez-Muñoz, M. H. & Guayasamin, J. M. (2016). Comparative phylogeography reveals cryptic diversity and repeated patterns of cladogenesis for amphibians and reptiles in northwestern Ecuador. *PLOS ONE*, 11(4). doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151746>
- [11] Guayasamin, J. M., Krynak, T., Krynak, K., Culebras, J. & Hutter, C. R. (2015). Phenotypic plasticity raises questions for taxonomically important traits: a remarkable new Andean rainfrog (*Pristimantis*) with the ability to change skin texture. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 173, 913–928. doi: <http://doi.org/10.1111/zoj.12222>
- [12] Brito, J., Batallas, D., y Velalcazar, D. (2014). Nueva especie de rana terrestre del género *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae), meseta de la Cordillera del Cóndor. *Papeis Avulsos de Zoología*, 54, 435–446. doi: <http://doi.org/10.1590/0031-1049.2014.54.30>
- [13] Reyes-Puig, J. P., Reyes-Puig, C., Ramirez-Jaramillo, S. R., Perez, M. B. y Yáñez-Muñoz, M. H. (2014). Tres nuevas especies de ranas terrestres *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de la cuenca alta del Río Pastaza, Ecuador. *ACI:Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(2), 51–62. doi: <http://doi.org/10.18272/aci.v6i2.179>
- [14] Lynch, J. D. D., and Edward, W. The eleutherodactylus of the amazonian slopes of the ecuadorian Andes (Anura: Leptodactylidae). *Miscellaneous publications*, 69,1–86. doi: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.16222>
- [15] Lehr, E. and Coloma, L. (2008). A minute new Ecuadorian Andean Frog (Anura: Strabomantidae, *Pristimantis*). *Herpetologica*, 64(3),354–367. doi: <https://doi.org/10.1655/07-089.1>
- [16] Bustamante, M. and Mendelson, J. (2008). A new frog species (Strabomantidae: *Pristimantis*) from the High Andes of Southeastern Ecuador. *Zootaxa*, 1820,49–59. doi: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.182997>
- [17] Brito, J. & Pozo-Zamora, G. (2013). Una nueva especie de rana terrestre del género *Pristimantis* (Amphibia: Craugastoridae), de la Cordillera de Kutukú, Ecuador. *Papeis Avulsos de Zoología*, 53(24), 315–325. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0031-1049.2014.54.30>



- [18] Guayasamin, J. M. and Arteaga, A. F. (2013). A new species of the *Pristimantis orestes* group (Amphibia: Strabomantidae) from the high Andes of Ecuador, Reserva Mazar. *Zootaxa*, 3616,345-346. doi: <http://doi.org/10.11646/zootaxa.3616.4.3>
- [19] Arteaga-Navarro, A. F. & Guayasamin, J. M. (2011). A new frog of the genus *Pristimantis* (Amphibia: Strabomantidae) from the high Andes of Southeastern Ecuador, discovered using morphological and molecular data. *Zootaxa*, 2876, 17–29.
- [20] Urgilés, V. L., Sánchez-Nivicela, J. C., Nieves, C. y Yáñez-Muñoz, M. H. (2014). Ranas terrestres en los ecosistemas surandinos de Ecuador I: Dos nuevas especies de *Pristimantis* (Anura: Craugastoridae) de la ladera oriental. *ACI: Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(1), 51-59. doi: <http://doi.org/10.18272/aci.v6i1.159>
- [21] Lehr, E., and Duellman, W. E. (2009). *Terrestrial-breeding frogs (Strabomantidae) in Peru*. Munster, Germany: Natur und Tier Verlag.
- [22] Heinicke, M. P., Lemmon, A. R., Lemmon, E. M., McGrath, K., & Hedges, S. B. (2018). Phylogenomic support for evolutionary relationships of New World direct-developing frogs (Anura: Terraranae). *Molecular phylogenetics and evolution*, 118, 145-155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2017.09.021>
- [23] Padial, J., Grant, T., & Frost, D. (2014). Molecular systematics of Terraranas (Anura: Brachycephaloidea) with an assessment of the effects of alignment and optimality criteria. *Zootaxa*, 3825, 1-132.
- [24] Batallas, D. y Brito, J. (2014). Nueva especie de rana del género *Pristimantis* del grupo *lacrimosus* (Amphibia: Craugastoridae) del Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Papéis Avulsos de Zoología*, 54,51– 62. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0031-1049.2014.54.05>
- [25] Charif, R. A., Waack, A. M., & Strickman, L. M. (2010). Raven Pro 1.4 user's manual. Ithaca, United States of America: Cornell Lab of Ornithology.
- [26] Duellman, W. E. and Pyles, R. A. (1983). Acoustic resource partitioning in anuran communities. *Copeia*, 1983,639-649. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/1444328>
- [27] Cocroft, R.B. & Ryan, M.J. (1995). Patterns of advertisement call evolution in toads and chorus frogs. *Animal Behaviour*, 49:283-303. doi: <https://doi.org/10.1006/anbe.1995.0043>
- [28] Angulo, A. (2006). Fundamentos de bioacústica y aspectos prácticos de grabaciones y análisis de cantos. *Técnicas de inventario y monitoreo para los anfibios de la Región Tropical Andina*. Bogotá, Colombia: Conservación Internacional.
- [29] Díaz, L. M., y Cádiz, A. (2006). Guía descriptiva para la identificación de las llamadas de anuncio de las ranas cubanas del género *Eleutherodactylus* (Anura: Leptodactylidae). *Herpetotropicos*, 3(2), 100-122.
- [30] Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012). *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental*. Quito, Ecuador: Subsecretaría de Patrimonio Natural.
- [31] Albuja, L., Ibarra, M., Urgilés, J., y Barriga, R. (1980). *Estudio Preliminar de los Vertebrados Ecuatorianos*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- [32] Boyle, D. G., Boyle, D. B., Olsen, V., Morgan, J. A. T., and Hyatt, A. D. (2004). Rapid quantitative detection of chytridiomycosis (*Batrachochytrium dendrobatidis*) in amphibian samples using real-time Taqman PCR assay. *Diseases of aquatic organisms*, 60(2), 141-148. doi: <http://doi.org/10.3354/dao060141>
- [33] Lynch, J. D. (1971). *The species groups of the South American frogs of the genus Eleutherodactylus (Leptodactylidae)* (No. 61). Kansas, United States of America: Museum of Natural History, University of Kansas. Recuperado de <http://biostor.org/reference/50169>
- [34] Lynch, J. D. (1981). *Leptodactylid frogs of the genus Eleutherodactylus in the Andes of northern Ecuador and adjacent Colombia* (No. 59 UNI). Kansas, United States of America: Museum of Natural History, University of Kansas. doi: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.16289>
- [35] Lynch, J. D., and Duellman, W. E. (1980). *The Eleutherodactylus of the Amazonian slopes of the ecuadorian Andes (Anura: Leptodactylidae)* (No. 59 UNI). Kansas, United States of America: Museum of Natural History, University of Kansas. doi: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.16222>
- [36] Pyron, R. A., & Wiens, J. J. (2011). A large-scale phylogeny of Amphibia including over 2800 species, and a revised classification of extant frogs, salamanders, and caecilians. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 61(2), 543-583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2011.06.012>
- [37] Guayasamin, J. M. (2004). The *Eleutherodactylus orcesi* species group (Anura: Leptodactylidae): comparative osteology and comments on its monophyly. *Herpetological Monographs*, 18(1), 142-174. doi: <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.4243.1.2>

TABLA 3. Sumario de principales caracteres utilizados para comparación de *Pristimantis canari* sp. nov.

Especie	Procesos dentigeros del vómer	Tímpano	Hendiduras bucales	Almohadillas nupciales	Crestas craneales	Tubérculos ulnares	Tubérculos sobre el párpado
<i>P. canari</i>	De contorno triangular	Presente	Presente	Presente	Ausentes	Presentes (dispuestos en hilera longitudinal a manera de pliegue)	Presentes
<i>P. obmutescens</i>	De contorno oblicuo	Oculto	Ausentes	Ausentes	Bajas, presentes en hembras adultas	Indistintos	Ausentes
<i>P. orcesi</i>	Ausente	Presente	Presentes	Presentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes
<i>P. ortizi</i>	Reducidos (difíciles de observar)	Presente	Presentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Con o sin un tubérculo pequeño
<i>P. racemus</i>	De contorno oblicuo	Presente	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes
<i>P. simoteriscus</i>	De contorno oblicuo	Presente	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes o pobremente definidos	Ausentes
<i>P. simoterus</i>	De contorno oblicuo	Presente	Presente	Ausentes	Presentes (débiles)	Ausentes	Ausentes
<i>P. thymelensis</i>	De contorno oblicuo	Visible u oculto	Presentes	-	Ausentes	Presentes	Ausentes

Dengue Serotype Differences in Urban and Semi-Rural Communities in Ecuador

Sully Márquez¹, Julio Carrera¹, Emilia Espín¹, Sara Cifuentes¹, Gabriel Trueba^{1*}, Josefina Coloma², Joseph N. Eisenberg³

¹ Microbiology Institute, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales; ²University of California, Berkley, USA; ³School of Public Health, University of Michigan, USA.

*Autor para correspondencia / Corresponding author, e-mail: gtrueba@usfq.edu.ec

Diferencias en los Serotipos de Dengue en Comunidades Urbanas y Semi-rurales en Ecuador

Resumen

El dengue es una importante infección transmitida por vectores que causa grandes brotes en las comunidades urbanas de las regiones tropicales. Durante el período 2010-2014; Se colectaron 434 muestras de suero de pacientes febriles de un hospital rural ubicado en la región noroccidente del Ecuador. Se investigó el virus Dengue (DENV) mediante PCR transcriptasa reversa; un total de 48 muestras fueron positivas para dengue. Durante nuestro estudio se detectaron los serotipos DENV-2 y DENV-3 de 2010 al 2013 y los cuatro serotipos de DENV durante el período 2013-2014. Sorpresivamente, nuestros resultados contrastaron con las encuestas realizadas en los centros urbanos de la costa ecuatoriana en las que DENV-1, DENV-2 y DENV-4 fueron prevalentes durante los años 2010-2013 y sólo 2 serotipos (DENV-1 y DENV-2) en el 2014. Estos resultados sugieren que los virus del dengue en comunidades rurales no se originaron en las ciudades ecuatorianas.

Palabras clave: Dengue, Borbon, comunidad rural, comunidad urbana, Esmeraldas, serotipos de dengue.

Abstract

Dengue is a major vector-borne infection causing large outbreaks in urban communities in tropical regions. During the 2010- 2014 period; 434 serum samples from febrile patients were collected from a semi-rural community hospital located in the northwestern region of Ecuador. Dengue virus (DENV) was investigated by reverse transcriptase PCR; a total of 48 samples were positive for dengue. During our study we detected DENV-2 and DENV-3 from 2010 to 2013 and the four DENV serotypes during the period 2013-2014. Surprisingly, our results contrasted with surveys carried out in urban centers throughout the Ecuadorian Coast in which DENV-1, DENV-2 and DENV-4 were prevalent during years 2010-2013 and only 2 serotypes (DENV-1 and DENV-2) in 2014. These results suggest that dengue viruses in semi-rural communities didn't originate in the Ecuadorian cities.

Keywords: Dengue, Borbon, semi-rural community, urban community, Esmeraldas, Dengue serotypes.



Editado por/
Edited by:
Diego F. Cisneros-
Heredia

Recibido/
Received:
2017/09/26

Aceptado/
Accepted:
2018/07/09

Publicado en línea/
Published online:
2018/09/14

INTRODUCTION

Dengue is one of the most important vector borne diseases in many tropical and subtropical regions of the world [1]. The etiological agent is a flavivirus comprising 4 serotypes (DENV1-4), which originated in Old World non-human primates 1000 years ago [2]. This virus is transmitted by 2 species of mosquito vectors: *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* which become infected when they feed on the blood of infected hosts [3]. Dengue virus has disseminated worldwide; in 2013, 3.6 billion people were estimated to live in areas where dengue virus could be transmitted; 50 to 200 million dengue infections occur annually and 500,000 cases correspond to severe dengue which causes 20,000 deaths. Severe dengue is characterized by 2 to 3 days of fever, haemorrhagic manifestations in mucosal and skin, vomiting, plasma leakage and hepatomegaly [4]. Dengue has an endemo-epidemic pattern with outbreaks every 5 years. Between 2008 and 2012, more than 1.2 million people were infected, from these, 28,333 were severe cases [5]; in the Americas, 19% of the cases occurred in the Andean countries [6]. Since dengue fever was introduced in Ecuador in 1988 the number of cases has increased; in 2014 there were 15,446 cases reported, 67 were severe dengue, resulting in 11 fatalities [7]. In 2015 there were 42,483 cases, 51 were severe dengue, no fatalities were reported [8].

The *Aedes* mosquitoes travel short distances (500 m), therefore transmission is facilitated by human mobility in urban centers where infected individuals live in close proximity to susceptible individuals [9]. This is especially critical in developing countries where cities suffer from uncontrolled urban growth, poverty and lack of basic infrastructure such as water distribution and garbage management. Water storage in open containers and accumulation of garbage favors the proliferation of mosquitoes [10]. Dengue in rural communities is thought to be the result of viral spillover from urban centers [11].

Control of dengue fever requires understanding the factors involved in the transmission of the virus. This report describes a discrepancy of serotype distribution between urban and semi-rural communities in Ecuador which may be important in future public health measures to control the disease.

MATERIALS AND METHODS

Sample collection

The study was conducted at the Civil Hospital in Borbon (HCB), in the Northwestern Coast of Ecuador. All the subjects accepted an oral informed consent which was approved by the USFQ Bioethics Committee and the University of Michigan Institutional Review Board.

A total of 434 serum samples from febrile patients were collected during the period of 2010-2014.



Viral RNA extraction

For viral RNA extraction, QIAamp Viral RNA Mini Kit (Qiagen, USA) was used with 140 μ l of serum sample, according to manufacturer's instructions. The serum sample was added to 560 μ l of AVL lysis buffer, then 560 μ l of ethanol 96% was added. 640 μ l were taken and put on a spin column. Centrifuge for 1 min at 4,651 X g. Residue of ethanol was discarded. Then 500 μ l of AW1 was added to the spin column. This was centrifuged for 1 min at 4,651 X g. Again the residue was discarded. The collection tube was changed and 500 μ l of AW2 was added and centrifuged for 3 min at 12,281 X g, and one more centrifuged was performed for 1 min at 12,281 X g to obtain the column dried. After that, 41 μ l of elution buffer was added and centrifuged for 1 min at 4,651 X g. This step was repeated one more time. 82 μ l of viral RNA was obtained and this was stored at -80°C until used.

For testing the quality of RNA extractions, β -actin gene amplification was used with the following primers: (primer forward, 5' CGG AAC CGC TCA TTG CC 3' and, reverse: 5' ACC CAC ACT GTG CCC ATC TA) [12].

Reverse transcriptase (RT-PCR) and sequencing

Multiplex RT-PCR was performed with the SuperScript III One-Step RT-PCR and Taq DNA Polymerase System with 5 μ l of viral RNA sample, according to the manufacturer's instructions (ThermoFisher, USA). The primers, previously reported by Harris *et al*, 1998, amplify different amplicon sizes for dengue serotypes as follows: D1: 5'-TCA ATA TGC TGA AAC GCG CGA GAA ACC G, TS1: 5'-CGT CTC AGT GAT CCG GGG G (482 bp, D1-TS1), TS2: 5'-CGC CAC AAG GGC CAT GAA CAG (119 bp, D2-TS2), TS3: 5'-TAA CAT CAT CAT GAG ACA GAG C (290 bp, D3-TS3), TS4: 5'-TGT TGT CTT AAA CAA GAG AGG TC (389 BP, D4-TS4) [13]. An electrophoresis was performed in a 1.5% of agarose gel with ethidium bromide. Furthermore, crude PCR products were sequenced by a third party (Functional Biosciences, Inc., WI).

Positive isolated dengue virus controls for each serotype were kindly donated by Instituto Nacional de Investigación en Salud Pública (INSPI), Guayaquil-Ecuador.

RESULTS

From 2010 to 2014, 11% of 434 samples (95% CI: 8.3-14.4) were positive for dengue in semi-rural communities. From 2010 to 2013, DENV-3 was detected in semi-rural communities but not in urban ones according to INSPI, while DENV-4 was detected in urban but not in semi-rural communities (Table 1). From 2013 to 2014 all dengue serotypes were detected in semi-rural communities but only DENV-1 and DENV-2 in urban communities (Table 2).

TABLE 1. Number of samples identified within different Dengue serotypes in a semi-rural community located in northern coast of Ecuador from 2010 to 2014.

YEAR	SEROTYPES			
	DENV-1	DENV-2	DENV-3	DENV-4
2010-2011	0	5	1	0
2011-2013	0	3	2	0
2013-2014	20	7	8	2

TABLE 2. Comparison between the presence of different dengue serotypes in Ecuador in semi-rural and urban communities with serotypes in Colombia (Santander department).

Communities	Years		
	2010-2011	2011-2013	2013-2014
Serotypes in semi-rural communities	2, 3	2, 3	1, 2, 3, 4
Serotypes in Urban communities (Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Zamora Chinchipe, Morona Santiago, Napo provinces) ¹	1, 2, 4 ¹	1, 2, 4 ¹	1, 2 ¹
Serotypes detected in (Santander-Colombia)	1,2,3,4 ¹⁷	1,2,3,4 ¹⁷	1,2,3,4 ¹⁷

¹INSPI, 2012

¹⁷Villabona-Arenas, 2016

DISCUSSION

We found that semi-rural communities in the northern coast of Ecuador (in close proximity to the Colombian border) have different dengue virus serotypes than urban coastal communities including the capital of the province, the port of Esmeraldas (Table 2) according to INSPI. In Colombia all the dengue serotypes have been reported since 2006 [14].

This phenomenon may indicate that people in these remote communities move more frequently to rural regions of the Colombian coast than to cities in Ecuador. There is no road connecting Ecuador and Colombia in this region, however there is an active commerce between semi-rural communities of these two countries which includes regular goods and illegal traffic of goods subsidized by the Ecuadorian government (such as gasoline and propane) and illegal drugs [15].



The other possibility is sylvatic dengue transmission, although no report of sylvatic transmission of dengue virus has been confirmed in the Americas. The Chocó humid forest has suffered massive deforestation, however there are some areas where howler monkeys (*Alouatta palliata*) and the machin monkey (*Cebus albifrons aequatorialis*) could still be found [16]. This means that there is the possibility that a sylvatic cycle is helping for the maintenance and transmission of the virus in a minor scale.

This report highlights the need for more research in this region. The potential entry of dengue virus (and other arboviruses) from Colombia to Ecuador by this route may require additional measures to control these diseases in Ecuador.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the study participants included in this investigation, ECODESS project and Mauricio Ayoví.

Financial support: This project was part funded by USFQ, University of Berkley. The content is solely the responsibility of the authors.

Disclaimer: The authors declare no conflict of interest.

Authors' addresses: Márquez, S., Carrera, J., Espín, E., Cifuentes, S., Trueba, G., Microbiology Institute, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador; Coloma, J., University of California, Berkley, USA; Eisenberg, J., School of Public Health, University of Michigan, USA.

AUTHOR'S CONTRIBUTIONS

Joseph N. Eisenberg, Josefina Coloma, conceived and design the analysis.

Julio Carrera, J., Emilia Espín, Sara Cifuentes, collected the samples from semi-rural communities and performed the analysis from 2010 to 2014.

Sully Márquez, Gabriel Trueba, collected the data of each period of time, and wrote the paper.

REFERENCES

- [1] Kyle, J.L., Harris, E. (2008). Global spread and persistence of dengue. *Annu Rev Microbiol*, 62, 71–92. doi: <https://doi.org/10.11146/annurev.micro.62.081307.163005>
- [2] Guzman, MG, Halstead, SB, Artsob, H, Buchy, P, Farrar, J, Gubler, DJ, . . . Peeling, RW. (2010). Dengue: a continuing global threat. *Nat Rev Microbiol*. 8: 57–16. doi: <https://doi.org/10.1038/nrmicro2460>
- [3] Kraemer, M.U., Sinka, M.E., Duda, K.A., Mylne, A.Q., Shearer, F.M., Barker, C.M., . . . Hay, S.I. (2015). The global distribution of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus*. *eLife*. 4:e08347. doi: <https://doi.org/10.7554/eLife.08347.001>
- [4] Sellaheewa, K. H. (2012). Pathogenesis of dengue haemorrhagic fever and its impact on case management. *ISRN Infectious Diseases*, vol:2013. doi: <http://dx.doi.org/10.5402/2013/571646>
- [5] World Health Organization. (2014). *State of the Art in the Prevention and Control of Dengue in the Americas*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- [6] World Health Organization. (2009). *Dengue: guidelines for diagnosis, treatment, prevention and control*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- [7] Ministry of Public Health of Ecuador. (2014). Gaceta epidemiológica semanal No. 51. *Gaceta Epidemiológica Ecuador SIVE-ALERTA*. Retrieved from: http://instituciones.msp.gob.ec/images/Documentos/Ministerio/EPIDEMIOLÓGIA/gaceta2014/Gaceta%20N%2051_opt.pdf
- [8] Ministry of Public Health of Ecuador. (2015). Gaceta epidemiológica semanal No. 51. *Gaceta Epidemiológica Ecuador SIVE-ALERTA*. Retrieved from: <http://instituciones.msp.gob.ec/images/Documentos/gaceta/GACETA%20SE%2052.pdf>
- [9] Azami, N. A. M., Salleh, S. A., Neoh, H. M., Zakaria, S. Z. S., & Jamal, R. (2011). Dengue epidemic in Malaysia: Not a predominantly urban disease anymore. *BMC research notes*, 4(1), 216. doi: <https://doi.org/10.1186/1756-0500-4-216>
- [10] Padilla J.C. (2012). Factores determinantes de la transmisión del dengue en Colombia. Hernández C, Mora M, Perdomo G, Ruiz S, Eds. *Dengue en Colombia: Epidemiología de la reemergencia a la hiperendemia*. Bogotá D.C, Colombia: Guías de Impresión Ltda, 1-5.
- [11] Raba, M. A., Klungthong, C., Yoon, I. K., Holmes, E. C., Chinnawirotpisan, P., Thaisomboonsuk, B., ... and Nisalak, A. (2013). Frequent in-migration and highly focal transmission of dengue viruses among children in Kamphaeng Phet, Thailand. *PLoS neglected tropical diseases*, 7(1), e1990. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0001990>
- [12] Sun, T., Jiang, D., Li, J., Han, D., & Song, Z. (2006). High expression of the RECK gene in breast cancer cells is related to low invasive capacity. *Chinese Journal of Clinical Oncology*, 3(5), 322-325. doi: <https://doi.org/10.1007/s11805-006-0096-y>
- [13] Harris, E., Roberts, T. G., Smith, L., Selle, J., Kramer, L. D., Valle, S., ... and Balmaseda, A. (1998). Typing of dengue viruses in clinical specimens and mosquitoes by single-tube multiplex reverse transcriptase PCR. *Journal of clinical microbiology*, 36(9), 2634-2639.
- [14] Pérez-Castro, R., Castellanos, J. E., Olano, V. A., Matiz, M. I., Jaramillo, J. F., Vargas, S. L., ... and Overgaard, H. J. (2016). Detection of all four dengue serotypes in *Aedes aegypti* female mosquitoes collected in a rural area in Colombia. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, 111(4), 233-240. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0074-02760150363>
- [15] Cragin, K., Hoffman, B., Berends, M., Williamson, S., and Sorensen, P. (2003). *Arms trafficking and Colombia*. California, United State of America: Rand National Defense Research Institute.
- [16] Vázquez, M. A., & Freile, J. F. (2005). Los bosques del suroccidente de la provincia de Esmeraldas: una visión general. of: Vázquez, MA, Freile, JF, & Suarez, L (Eds), *Biodivers. en el suroccidente la Prov. Esmeraldas Un Rep. las evaluaciones ecológicas*. Quito, Ecuador: EcoCiencia y MAE Seco.
- [17] Villabona-Arenas, C. J., Jimenez, R. E. O., & Silva, C. L. J. (2016). Dengue vaccine: considerations before rollout in Colombia. *PLoS neglected tropical diseases*, 10(6), e0004653. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0004653>

La Lechuza Campanaria *Tyto alba* (Strigiformes: Tytonidae) como regulador de plagas en un ecosistema urbano altoandino en el sur del Ecuador

Bernarda E. Vásquez-Avila^{1*}, Carlos Niveló-Villavicencio², Patricio R. Picon¹, Michelle K. Armijos¹, Cristina B. Vasquez¹, Pedro X. Astudillo³

¹ Escuela de Biología, Ecología y Gestión. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador.

² Laboratorio de Vertebrados, Museo de Zoología, Universidad del Azuay MZUA. Cuenca, Ecuador.

³ Laboratorio de Ecología, Escuela de Biología, Ecología y Gestión, Universidad del Azuay, Av. 24 de mayo 7-77 y Hernán Malo, Apartado 01.01.981, Cuenca, Ecuador.

*Autor para correspondencia/Corresponding author, e-mail: bernardavasquez60@gmail.com

Barn Owl, *Tyto alba* (Strigiformes: Tytonidae) as pest control in a high Andean urban ecosystem of southern Ecuador

Abstract

The progressive expansion of the cities not only implies modification of ecosystems, but it is also associated with the introduction of pest species. In this sense, it is important to evaluate how native species act as pest control. To assess this, we present an analysis of the diet, based on pellets, of *Tyto alba* (Barn owl) in the city of Cuenca, Ecuador. Based on 32 pellets, collected between April and June 2017, a total of 154 individual prey items were recorded of nine species. Rodents were the most abundant prey with 129 records (84%) as well as the ones with the highest biomass, 49 g (93%). More importantly, both the biomass and the abundance of the genus *Rattus* (Rats) were significantly higher when compared to the other prey species. It is evident that *T. alba* plays a role in pest control in the city of Cuenca. These findings are similar to those reported for *T. alba* in several localities across the continent; consequently, it is a key species in the control of pest rodents with an evident positive effect on the health of urban ecosystems.

Keywords: pest control, pellets, *Rattus*, Cuenca.

Resumen

La progresiva expansión de las urbes no solo implica modificación de los ecosistemas, está también asociada a la introducción de especies plaga. En este sentido, es importante evaluar cómo especies nativas actúan como controladores de plagas. Para asegurar esto, se presenta un análisis de la dieta, basada en egagrópias, de *Tyto alba* (Lechuza Campanaria) en la ciudad de Cuenca, Ecuador. En base a 32 egagrópias, colectadas entre Abril y Junio de 2017, se registró un total de 154 presas asociadas a nueve identidades taxonómicas. Los roedores fueron las presas más abundantes



Editado por /
Edited by:
Diego F. Cisneros -
Heredia

Recibido /
Received:
2016/08/10

Aceptado /
Accepted:
2017/06/31

Publicado en línea /
Published online:
2018/04/15

con 129 registros (84%) como así también fueron los de mayor biomasa, 49 g (93%). Más importante, tanto la abundancia como biomasa del género *Rattus* (ratas) fueron significativamente mayores al comparar con el resto de presas. Es evidente, que *T. alba* cumple un rol como controlador de plagas en la ciudad de Cuenca. Estos hallazgos son similares a los reportados para *T. alba* en varias localidades a través del continente; en consecuencia, es una especie clave en el control de roedores con un efecto positivo sobre la salud de los ecosistemas urbanos.

Palabras clave: control de plagas, egagrópilas, *Rattus*, Cuenca.

INTRODUCCIÓN

La acelerada urbanización de los espacios genera cambios en los ecosistemas modificando la configuración del paisaje con efectos profundos sobre la fauna [1]. Las actividades humanas pueden promover la introducción de especies exóticas e incrementar los patrones de abundancia de especies que son plagas en ambientes urbanos y rurales [2,3]. Las aves rapaces juegan un papel importante al encontrarse en los niveles tróficos más altos y pueden responder rápidamente a patrones de incremento en las poblaciones de presas [4]. Las rapaces también se alimentan de especies introducidas en ecosistemas alterados por actividades antrópicas [5,6]. Varios estudios han demostrado que las aves rapaces pueden disminuir las poblaciones de roedores en ecosistemas agrícolas o indirectamente limitar su impacto negativo en ambientes urbanos [5–11]. A pesar de su importancia, información sobre cómo las rapaces contribuyen al control de plagas de roedores en ecosistemas urbanos es aún limitada [4].

Una proporción significativa de las urbes ecuatorianas se asientan sobre valles interandinos. Estos valles son un mosaico de hábitats modificados en asociación con remanentes de hábitats naturales [12]. La ciudad de Cuenca, asentada en el valle interandino del Azuay, y a pesar de su condición urbanizada, alberga una muestra representativa de la avifauna Andina del sur del Ecuador [13]. Dentro de estas especies se encuentra *Tyto alba* Lechuza Campanaria, de hábitos nocturnos [14-19] y cuya dieta incluye aves, insectos, anfibios, reptiles y pequeños mamíferos [20,21], aunque, también se ha reportado como una rapaz especialista en roedores [22,23]. En adición, Cuenca también ha sido reportada como un área donde están presentes varias especies de pequeños mamíferos, pudiendo encontrarse especies tanto nativas como introducidas [24].

Varios estudios sobre la dieta de *Tyto alba* se han concentrado en zonas rurales a través de la región Andina [25–27]. El estudio realizado por Charpentier, y Martínez, [23] en el área urbana de la ciudad de Cuenca, por ejemplo, evaluó la composición de la dieta de *T. alba*, evidenciando una dominancia de roedores; sin embargo, las conclusiones no se enfocaron específicamente en demostrar el rol potencial de *T. alba* como controlador de plagas. En consecuencia, en el ambiente urbano de la ciudad de Cuenca, la limitada disponibilidad de hábitat natural se traduce en una distribución localizada de roedores



nativos [24], no así para roedores plaga, los cuales están ampliamente distribuidos a través de la urbe [28,29]. Es importante determinar si *Tyto alba*, especie bien adaptada a la ciudad de Cuenca [13], es un controlador importante de roedores plaga en ecosistemas urbanos. El presente estudio busca determinar si la composición de presas dispuestas por *T. alba*, vía análisis de egagrópilas, contienen mayor abundancia y biomasa de roedores plaga.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el casco urbano de la ciudad de Cuenca, ubicada en un valle interandino en la provincia del Azuay, Ecuador (2.903°S, 79.007°W). Cuenca presenta una temperatura promedio anual de 13°C, con rangos entre 14°C y 18°C. La precipitación promedio es de 610 mm, con precipitaciones máximas desde diciembre a de mayo, mientras que las precipitaciones mínimas suceden desde junio a septiembre [30]. El área de estudio tiene un paisaje con una gran cantidad de infraestructura urbana y remanentes naturales escasos, principalmente ubicados en las riberas de los cuatro ríos que atraviesan la ciudad. Parte del paisaje urbano de Cuenca incluye varios mercados de abasto ubicados mayormente en zonas del centro histórico, algunas casas vetustas y terrenos baldíos. Hay una fuerte presencia de especies exóticas, incluyendo palomas domesticas (*Columba livia*) y roedores (e.g., *Rattus rattus* y *R. norvegicus*). *Tyto alba* ocupa la infraestructura urbana de Cuenca, ubicando nidos y dormitorios en campanarios de iglesias y techos de casas coloniales, usando terrenos baldíos, zonas abiertas para sitios de caza y zonas con vegetación en parques como sitios de percha.

Colecta v análisis de eagaróbilas

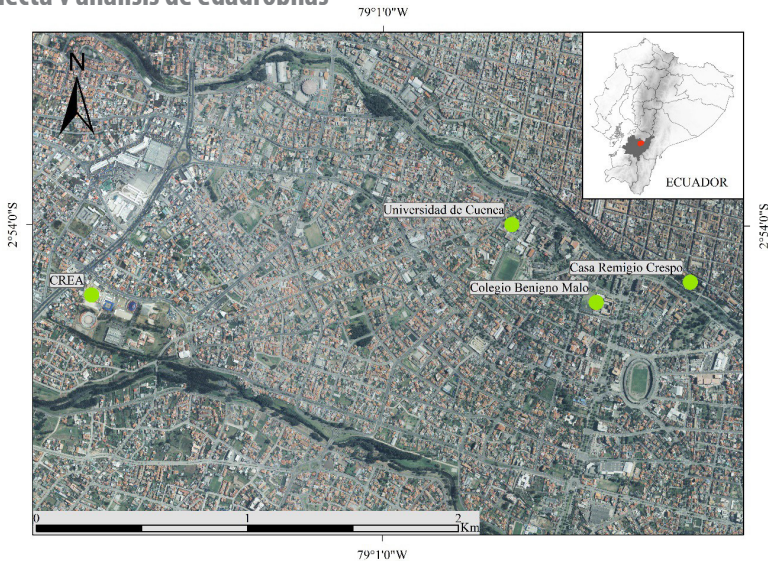


FIGURA 1. Área de estudio, ciudad de Cuenca, Ecuador (en rojo). Los círculos verdes representan la ubicación de cuatro dormitorios activos de *Tyto alba*.

La mayoría del conocimiento sobre hábitos alimenticios se basa en análisis de egagrópilas [31,32]. Las egagrópilas proporcionan información sobre la composición de presas de rapaces y permiten reconocer la identidad de pequeños vertebrados [33,34]. Las egagrópilas brindan un rápido indicador de la abundancia relativa de mamíferos dentro de las áreas de alimentación de rapaces [35]. En base a registros previos de actividad de dormideros que ocupa *Tyto alba* [23], se escogieron cuatro localidades dentro del casco urbano de Cuenca (Fig.1). En cada localidad se organizó una expedición previa para reconocer el dormidero, y determinar si estaba activo vía observación directa. Entre abril y junio de 2017 se colectaron en total 32 egagrópilas en los cuatro dormideros. Todas las muestras fueron analizadas en el Museo de Zoología de la Universidad del Azuay (MZUA). Las egagrópilas fueron disgregadas mediante el uso de pinzas y agua destilada, una vez separados los restos no digeridos fueron limpiados con alcohol al 30% para luego proceder con su identificación taxonómica [25]. Las muestras obtenidas se clasificaron en diferentes niveles morfológicos (i.e., cráneo, mandíbulas, pelvis, patas, antebrazos, articulaciones) [36]. Para la identificación taxonómica se usaron guías especializadas [37–41] y se comparó también con la colección del MZUA. El nivel de clasificación llegó hasta la máxima categoría taxonómica posible (Tabla 1).

TABLA 1. Número Mínimo de Individuos (NMI) y biomasa de las presas identificadas en 32 egagrópilas de *Tyto alba*, recolectadas en cuatro dormideros en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

	NMI			Biomasa (g)		
	(%)	Promedio	SD	(%)	Promedio	SD
INSECTA						
Coleoptera	18 (11.68)	4.5	1.29	2.21 (4.15)	0.50	0.28
REPTILIA						
*Squamata	4 (2.59)	1	1,15	0.37 (0.69)	0.07	0.07
AVES						
Passeriforme						
Emberizidae						
* <i>Zonotrichia capensis</i>	2 (1.29)	--	--	1.09 (2.05)	--	--
MAMMALIA						
Rodentia						
129 (83.75)			49.21 (92.54)			
Cricetidae						
<i>Akodon mollis</i>	15 (9.74)	3.75	2.98	1.58 (2.97)	0.40	0.39
<i>Micoryzomys</i>	13 (8.44)	3.25	3.30	2.03 (3.81)	0.51	0.54
* <i>Oligoryzomys spodiurus</i>	1 (0.64)	--	--	0.14 (0.26)	--	--
Muridae						
<i>Mus musculus</i>	14 (9.09)	3.5	4.35	4.04 (7.59)	1.01	1.86
<i>Rattus</i>	86 (55.84)	21.5	7.14	41.42 (77.91)	9.89	4.34
Chiroptera						
Phyllostomidae						
* <i>Desmodus rotundus</i>	1 (0.64)	--	--	0.28 (0.52)	--	--
Total	154			53.16		

*Identidades taxonómicas que no se incluyeron en los análisis debido a la baja tasa de registros.



Análisis de datos

La abundancia fue calculada vía determinación del número mínimo de individuos (NMI) [42]. El NMI se basa en el conteo de mandíbulas homólogas o restos de cráneos sin considerar otras partes del esqueleto, evitando así doble conteos. En invertebrados el NMI se calculó usando élitros y capsulas de la cabeza [43]. En adición, la biomasa fue obtenida multiplicando el peso promedio de todos los individuos por especies (en gramos) por su NMI [44], donde el peso promedio es el resultado de la suma de los pesos en relación al total de individuos por egagrópila. Para realizar los análisis se agrupo el NMI y biomasa en géneros para disponer de más datos por observación; la identidad taxonómica es la unidad de análisis. Adicionalmente, se empleó un MANOVA para determinar si existen diferencias significativas en el NMI y la biomasa, a través de la identidad taxonómica de las presas [45]. Todas las variables de respuesta fueron transformadas usando la fórmula de raíz (prueba de Shapiro en los residuos: todos los p-valores > 0.05). Todos los análisis se realizaron en R 2.15.2 [46] con un $\alpha = 0.05$.

RESULTADOS

En total se registró 154 individuos en 32 egagrópilas (promedio = 4,58 individuos/egagrópila) asociados a nueve identidades taxonómicas (Tabla 1). Los roedores fueron el grupo con mayor número mínimo de individuos (NMI) con 129 presas (83.75%). *Rattus* presenta el mayor NMI (55.84%), seguida de *Akodon mollis* (9.74%), *Mus musculus* (9.09%), *Mycrorizomys* (8.44%) y *Oligoryzomys spodiurus* (0.64%) (Tabla 1; Fig. 2). Los roedores contribuyeron con la mayor cantidad de biomasa consumida (92.54%). *Rattus* tuvo la mayor biomasa (77.91%), seguida de *Mus musculus* (7.59%), *Mycrorizomys* (3.81%), *Akodon mollis* (2.97%) y *Oligoryzomys spodiurus* (0.26%) (Tabla 1; Fig. 2). El NMI y la biomasa varían significativamente entre las presas (MANOVA = $F_{4,15} = 2.73$ $p < 0.001$). *Rattus* presenta valores significativamente mayores tanto en NMI (Tukey pareado; $p < 0.001$; Fig. 3A), como en biomasa (Tukey pareado; $p < 0.001$; Fig. 3B).

DISCUSIÓN

A pesar de que *Tyto alba* consume un amplio rango de especies [20–23], prefiere pequeños mamíferos. En los dormitorios de la ciudad de Cuenca, *T. alba* muestra preferencia por presas del género *Rattus*, tanto en número como en biomasa. La preferencia de *T. alba* por roedores del género *Rattus* puede estar relacionada con la ubicación de los dormitorios. Los dormitorios en la ciudad de Cuenca se encuentran cerca de ríos o mercados, donde *Rattus* son más abundantes que roedores nativos [50,51]. Así, *T. alba* buscaría consumir un mayor número de presas que representen un gasto mínimo de energía al desplazarse, optimizando su ganancia energética [53]. La preferencia de *T. alba* por presas con mayor biomasa también ha sido reportada en otras localidades del valle interandino [22]. Dado que la mayor masa en roedores está generalmente asociada a individuos reproductores [3], es posible que la población de roedores plaga se vuelva inestable por la depredación de *T. alba*, disminuyendo así el potencial reproductivo de la población.

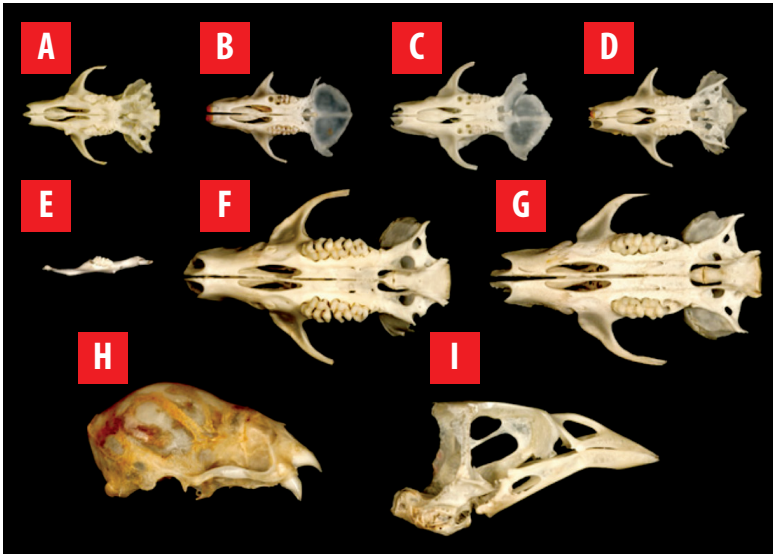


FIGURA 2. Cráneos de las identidades taxonómicas registradas en 32 egagrópilas de *Tyto alba* en la ciudad de Cuenca, Ecuador. **A** vista ventral de *Akodon mollis*, **B** vista ventral de *Microroryzomys altissimus*, **C** vista ventral de *Microroryzomys minutus*, **D** vista ventral de *Oligoryzomys spodiurus*, **E** vista superior de la mandíbula derecha de *Mus musculus*, **F** vista ventral de *Rattus norvegicus*, **G** vista ventral de *Rattus rattus*, **H** vista lateral de *Desmodus rotundus*, **I** vista lateral de *Zonotrichia capensis*. Barra = 10 mm.

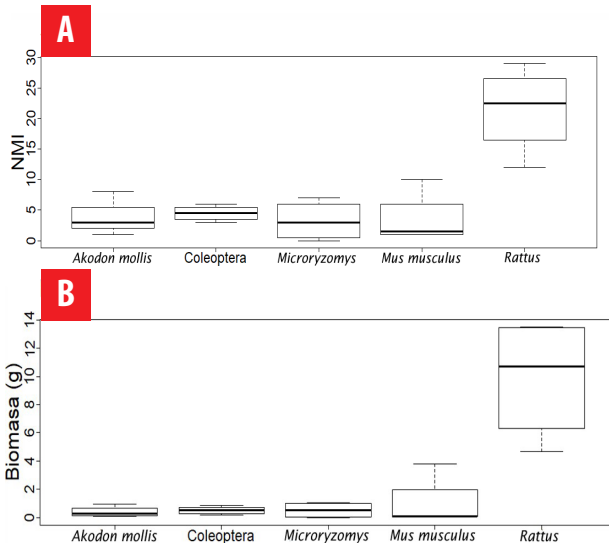


FIGURA 3. Diagramas de caja que muestran los cambios en el Número Mínimo de Individuos (NMI; **A**) y la biomasa (**B**) registrados en 32 egagrópilas de *Tyto alba* en la urbe de la ciudad de Cuenca, Ecuador. En ambas figuras, el género *Rattus* difiere significativamente ($p < 0.05$). Las líneas verticales muestran los valores mínimos y máximos, la línea negra de la caja el valor de la mediana.



Estos resultados son similares a otras investigaciones que han reportado que *T. alba* puede funcionar como un controlador biológico de roedores plaga en ecosistemas urbanos [49– 52]. Dado que en general roedores del genero *Rattus* son considerados como plagas perjudiciales para el ambiente [3,47–49]; *Tyto alba* podría cumplir un rol determinante para recuperar el equilibrio de los ecosistemas y regular las poblaciones de roedores introducidos, así como, para evitar la proliferación de plagas en ecosistemas urbanos. Estos resultados podrían facilitar el desarrollo de planes de manejo sobre fauna urbana y evidencian la importancia de rapaces urbanas como controladores biológicos.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Jacinto Guillén de la Universidad del Azuay por el apoyo constante a nuestras investigaciones, José Falcón y Marco Ortega por su importante contribución en la logística y al Blgo. David Siddons por su ayuda en la edición del artículo. El Museo de Zoología de la Universidad del Azuay está regido por la patente ambiental FAUS UDA MUSEO DE ZOOLOGÍA 003 2016.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Bernarda Vásquez, Patricio Picón, Michelle Armijos y Cristina Vásquez concibieron la investigación, desarrollaron la metodología y realizaron el trabajo de campo. Bernarda Vásquez, Carlos Niveló, Patricio Picón, Michelle Armijos y Cristina Vásquez realizaron la identificación de los individuos. Bernarda Vásquez y Carlos Niveló redacción del manuscrito. Pedro Astudillo y Bernarda Vásquez diseñaron el estudio, desarrollaron el modelo estadístico y ejecutaron los análisis, Pedro Astudillo revisó el contenido intelectual del manuscrito. Patricio Picón realizó las fotografías.

REFERENCIAS

- [1] Hooper, D., Adair, E., Cardinale, B., Byrnes, J., Hungate, B., Matulich, K., and O'Connor, M. (2012). A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 486(7401), 105–108. doi: <https://dx.doi.org/10.1038/nature11118>
- [2] Sala, O., Chapin, F., Armesto, J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber- Sanwald, E., Huenneke, L., Jackson, R., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D., Mooney, H., Oesterheld, M., Poff, N., Sykes, M., Walker, B., Walker, M., and Wall, D. (2000). Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 287 (5459), 1770–1774. doi: <https://dx.doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>
- [3] Picasso, G., y Rodríguez, E. (2008). Especies invasoras como agentes de cambio global. E. Schüttler, y C. S. Karez (Eds.), *Especies exóticas invasoras en las Reservas de Biosfera de América Latina y el Caribe. Un informe técnico para fomentar el intercambio de experiencias entre las Reservas de Biosfera y promover el manejo efectivo de las invasiones biológicas* (pp.9). Montevideo, Uruguay: UNESCO. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001827/182768s.pdf>
- [4] Sekercioglu, C. H. (2006). Increasing awareness of avian ecological function. *Trends in Ecology and Evolution*, 21(8), 464–471. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2006.05.007>
- [5] Abramsky, Z., Rosenzweig, M., and Subach, A. (2002). The costs of apprehensive foraging. *Ecology*, 83(5), 1330–1340. doi: <https://dx.doi.org/10.2307/3071947>
- [6] Brown, J., Kotler, B., Smith, R., and Wirtz II, W. (1988). The effects of owl predation on the foraging behavior of heteromyid rodents. *Oecologia*, 76(3), 408–415. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00377036>
- [7] Carevic, F. (2011). Rol del pequén (*Athene cunicularia*) como controlador biológico mediante el análisis de sus hábitos alimentarios en la Provincia de Iquique, norte de Chile. *Idesia*, 29(1), 15–21. doi: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000100003>
- [8] Hegdal, P., and Blaskiewicz, R. (1984). Evaluation of the potential hazard to barn owls of talon (brodifacoum bait) used to control rats and house mice. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 3(1), 167–179. doi: <https://dx.doi.org/10.1002/etc.5620030119>
- [9] Kay, B., Twigg, L., Korn, T., and Nicol, H. (1994). The use of artificial perches to increase predation on house mice (*Mus domesticus*) by raptors. *Wildlife Research*, 21(1), 95–105. doi: <https://dx.doi.org/10.1071/WR9940095>
- [10] Quintero-Romanillo, A., Barreras-Fitch, R., Orozco-Gerardo, J., and Rangel-Cota, G. (2009). Determination of birds of prey species in the supplying area of Sugarcane (*Sacharum officinarum*) of the sugar company of Los Mochis S. A. of C. V., which can be used in integrated pest management as biological control. *Ra Ximhai*, 5(2), 239–245. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/461/46111507009.pdf>
- [11] Rau, J. (2014). *Papel ecológico de las aves rapaces: del mito a su conocimiento y conservación en Chile*. Osorno, Chile: Gráfica Metropolitana.
- [12] Vanacker, V., Govers, G., Barros, S., Poesen, J., and Deckers, J. (2003). The effect of short-term socio-economic and demographic change on landuse dynamics and its corresponding geomorphic response with relation to water erosion in a tropical mountainous catchment, Ecuador. *Landscape Ecology*, 18(1), 1–15. doi: <https://dx.doi.org/10.1023/A:1022902914221>
- [13] Estudillo, P. X., and Siddons, D. C. (2013). *Avifauna de Santa Ana de los Cuatro Rios de Cuenca, Ecuador*. Cuenca, Ecuador: Editorial Don Bosco-Centro Gráfico Salesiano.
- [14] Fjeldsã, J., and Krabbe, N. (1990). *Birds of the high Ande a manual to the birds of the temperate zone of the Andes and Patagonia, South America*. Denmark: Apollo Booksellers.
- [15] Bellocq, M. (2000). A review of the trophic ecology of the Barn Owl in Argentina. *Journal of Raptor Research*, 34(2), 108–119. Recuperado de <https://sora.unm.edu/sites/default/files/journals/jrr/v034n02/p00108-p00119.pdf>
- [16] Bó, M., Baladrón, A., and Biondi, L. (2007). Ecología trófica de Falconiformes y Strigiformes: tiempo de síntesis. *Hornero*, 22 (2), 97–115. Recuperado de http://digital.bl.fcen.uba.ar/download/hornero/hornero_v022_n02_p097.pdf
- [17] Proudfoot, G. (2011). Owls of the World, 2nd ed. *The Auk*, 128(1), 187–189. doi: <https://doi.org/10.1525/auk.2011.128.1.187>



- [18] Thiollay, J.M. (2001). Long-term changes of raptor populations in Northern Cameroon. *J. Raptor Res*, 35(35), 173–18. Recuperado de <https://sora.unm.edu/sites/default/files/journals/jrr/v035n03/p00173-p00186.pdf>
- [19] Venable, N. J. (1996). Barn Owl. En L. Graffious, and J. Phillips (Eds.), *Birds of Prey* (pp.34–35). West Virginia, United States of America: West Virginia University.
- [20] Moreno, P. A. (2010). Mamíferos presentes en la dieta de la Lechuza de Campanario (*Tyto alba*) en Valdivia, provincia de Guayas, Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 2(3), 87–90. doi: <http://dx.doi.org/10.18272/aci.v2i3.50>
- [21] Rocha, R., Ferreira, E., Leite, Y., Fonseca, C., and Costa, L. (2011). Small mammals in the diet of barn owls, *Tyto alba* (Aves: Strigiformes) along the mid- Araguaia river in central Brazil. *Zoologia (Curitiba)*, 28(6), 709–716. doi: <https://dx.doi.org/10.1590/S1984-46702011000600003>
- [22] Brito, J., Orellana-Vásquez, H., Cadena-Ortiz, H., Vargas, R., Pozo-Zamora, G., and Curay, J. (2015). Mamíferos pequeños en la dieta de la lechuza *Tyto alba* (Strigiformes: Tytonidae) en dos localidades del occidente de Ecuador, con ampliación distribucional de *Ichthyomys hydrobates* (Rodentia: Cricetidae). *SciELO*, 55(19), 261–268. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0031-1049.2015.55.19>
- [23] Charpentier, A., and Martínez, J. (2007). *Abundancia y Dieta de (Tyto alba), la lechuza de campanario, en la ciudad de Cuenca* (Tesis de Licenciatura). Universidad del Azuay, Cuenca.
- [24] Fernández de Córdova-Torres, J., and Niveló, C. (2016). *Guía de mamíferos de las zonas urbana y periurbana de Cuenca*. Cuenca, Ecuador: Editorial Don Bosco- Centro Gráfico Salesiano.
- [25] Delgado, C., and Cataño-B., E. (2004). Diet of the Barn owl (*Tyto alba*) in the lowlands of Antioquia, Colombia. *Ornitología Neotropical*, 15, 413–415.
- [26] Fuentes, L., Sequera, I., Poleo, C., and Díaz, L. (2015). Composición de la dieta de *Tyto alba Scopoli* en hábitats de Calabozo, Venezuela. *Investigación Agraria*, 17(1), 46–53. doi: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2015.junio.46-53>
- [27] Figueroa, R. A., Rau, J. R., Mayorga, S., Martínez, D. R., Corales, E. S., Mansilla, A., and Figueroa M., R. (2009). Rodent Prey of the Barn Owl *Tyto alba* and Short- Eared Owl *Asio flammeus* During Winter in Agricultural Lands in Southern Chile. *Wildlife Biology*, 15(2), 129–136. doi: <https://dx.doi.org/10.2981/08-005>
- [28] Llimona, F., Cahill, S., Tenés, A., Camps, D., Bonet-Arbolí, V., and Cabañeros, L. (2007). El estudio de los mamíferos en relación a la gestión de áreas periurbanas. El caso de la región metropolitana de Barcelona. *Galemys*, 19(nº especial), 215–234.
- [29] Ramírez-Chaves, H., Pérez, W., and Ramírez-Mosquera, J. (2008). Mamíferos presentes en el municipio de Popayán. *bol. cient.mus.hist.nat*, 12, 65–89. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/bccm/v12n1/v12n1a05.pdf>
- [30] Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., and Feyen, J. (2007). Space–time Rainfall Variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316–3327. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.6575>
- [31] Freile, J., Guevara, E. A., Pacheco, C., y Santander, T. (2015). Los Búhos de Ecuador. En P. Enríquez (Ed.), *Los Búhos Neotropicales: Diversidad y Conservación* (pp.331–353). Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur.
- [32] Marti, C. D., Steenhof, K., Kochert, M. N., and Marks, J. S. (1993). Community Trophic Structure: The Roles of Diet, Body Size, and Activity Time in Vertebrate Predators. *Oikos*, 67(1), 6–18. doi: <https://dx.doi.org/10.2307/3545090>
- [33] Bonvicino, C. R., and Bezerra, A. M. R. (2003). Use of Regurgitated Pellets of Barn Owl (*Tyto alba*) for Inventorying Small Mammals in the Cerrado of Central Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 38(1), 1–5. doi: <https://dx.doi.org/10.1076/snfe.38.1.1.14030>
- [34] Guimaraes, S., Fernandez-Jalvo, Y., Stoetzel, E., Gorgé, O., Bennett, E. A., Denys, C., and Geigl, E. M. (2016). Owl pellets: A wise DNA source for small mammal genetics. *Journal of Zoology*, 298(1), 64–74. doi: <https://dx.doi.org/10.1111/jzo.12285>
- [35] Glue, D. E. (1967). Prey taken by the Barn Owl in England and Wales. *Bird Study*, 14(3), 169–183. doi: <https://doi.org/10.1080/00063656709476160>
- [36] Herrera, C. (1974). Regimen alimenticio de *Tyto alba* en España sudoccidental. *Ardeola*, 19. Recuperado de <http://www.ardeola.org/files/1023.pdf>
- [37] Carleton, M. D., and Musser, G. G. (1989). Systematic studies of oryzomyine rodents (Muridae, Sigmodontinae): a synopsis of *Microrozomys*. *Bulletin of the AMNH*, 191, 1–83. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2246/953>

- [38] Gaunt, W. A. (1995). The Development of the molar pattern of the mouse (*Mus musculus*). *Acta anat*, 24, 249–268. doi: <https://dx.doi.org/10.1159/000141046>
- [39] Patton, J. L., Pardiñas, U. F. J., and D'Elia, G. (Eds.). (2015). Mammals of South America, Vol.2. Rodents. *Journal of Mammalogy*, 97(1), 321–323. doi: <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyv164>
- [40] Tirira, D. G. (2017). *Mamíferos del Ecuador*. Quito, Ecuador: Editorial Murciélago Blanco.
- [41] Weksler, M., and Percequillo, A. R. (2011). Key to the genera of the tribe Oryzomyini (Rodentia: Cricetidae: Sigmodontinae). *Mastozoología neotropical*, 18(2).
- [42] Plug, C., and Plug, I. (1990). MNI Counts as Estimates of Species Abundance. *The South African Archaeological Bulletin*, 45(151), 53–57. doi: <https://doi.org/10.2307/3887918>
- [43] Manning, R. W., and Jones, J. K. (1990). Remains of small mammals recovered from Barn Owl pellets from Crosby county, Texas. *Texas Journal of Science*, 42(3), 311-312.
- [44] Herrera, C., and Jaksí, F. (1980). Feeding Ecology of the Barn Owl in Central Chile and Southern Spain: A Comparative Study. *The Auk*, 97(4), 760–767. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/4085747>
- [45] Zar, J. H. (1984). *Biostatistical analysis*. New Jersey, United States of America: Prentice-Hall. Recuperado de https://openlibrary.org/books/OL3171690M/Biostatistical_analysis
- [46] R Development Core Team. (2011). *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: The R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <http://www.R-project.org/>
- [47] Núñez S., F.; Cisterna L., P. (1991). Roedores domésticos I. Caracterización morfológica conductual y sanitaria. *Monografías de Medicina Veterinaria*, 13(1).
- [48] Lobos, G., Ferres, M., and Palma, E. (2005). Presencia de los géneros invasores *Mus* y *Rattus* en áreas naturales de Chile: un riesgo ambiental y epidemiológico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 78(1), 113–124. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2005000100008>
- [49] Figueroa, R., Soraya, R., Stappung, C., Cerda, J., Hernaldo, C., y Pérez, S. (2001). La importancia de las aves rapaces y los carnívoros. *Roedores, Rapaces y Carnívoros en Aysen (pp.9)*. Gobierno Regional de Aysén Coyhaique, Chile: Servicio Agrícola y Ganadero. Recuperado de http://www.sag.cl/sites/default/files/roedores_rapaces_aysen.pdf
- [50] Buj, A. (1999). Los riesgos epidémicos actuales desde una perspectiva geográfica. *Revista Electronica de Geografía y Ciencias Sociales*. Recuperado de <http://www.ub.edu/geocrit/sn-39.htm>
- [51] Uria, I. T., Cámara, J. M., y Escobar, F. J. (2013). Identificación y cartografiado de factores de riesgo en la proliferación de rata de alcantarilla (*Rattus norvegicus*) en medio urbano. *Revista de Salud Ambiental*, 13(2), 148-157.
- [52] Hernández-Muñoz, A., y Mancina, C. A. (2011). La dieta de la lechuza (*Tyto alba*) (Aves: Strigiformes) en hábitats naturales y antropogénicos de la región central de Cuba. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(1), 217–226. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532011000100019
- [53] Gutiérrez, G. (1998). Estrategias de forrajeo. En R. Ardila, W. López, A.M. Pérez, R. Quiñones, y F. Reyes (Eds.), *Manual de Análisis Experimental del Comportamiento* (pp. 359–381). Madrid, España: Librería Nueva.

Ampliación del rango de distribución de *Rhipidomys leucodactylus* (Rodentia: Cricetidae): una nueva localidad para el suroriente del Ecuador

Carlos Niveló-Villavicencio^{1*}, Javier Fernández de Córdova^{1,2}, Pedro X. Astudillo³.

¹Laboratorio de Mastozoología, Museo de Zoología de la Universidad del Azuay, Av. 24 de mayo 7-77 y Hernán Malo. Cuenca, Ecuador.

²Facultad de Ciencias Exactas, Universidad de Buenos Aires, Av. Int. Güiraldes 2620, Pabellón II, Ciudad Universitaria, 1428 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

³Laboratorio de Ecología, Escuela de Biología, Ecología y Gestión, Universidad del Azuay, Av. 24 de mayo 7-77 y Hernán Malo. Cuenca, Ecuador.

*Autor para correspondencia / Corresponding author, e-mail: cvillavicencio@uazuay.edu.ec

Extension of the distribution range of *Rhipidomys leucodactylus* (Rodentia: Cricetidae): a new locality in south-eastern Ecuador

Abstract

Rhipidomys leucodactylus has been reported from the Andean slopes of western and northeastern Ecuador. Herein, we report an adult male *R. leucodactylus* from a low montane evergreen forest on the southeastern Andes of Ecuador, at an elevation of 2164 m. This report provides the highest known record of the species and a new locality in southeastern Ecuador.

Keywords: Andes, distribution, elevation, Morona-Santiago, Sigmodontinae, Tinajillas-Río Gualaceño.

Resumen

Rhipidomys leucodactylus ha sido reportado en las laderas andinas del occidente y nororiente del Ecuador. En este trabajo nosotros reportamos un macho adulto de *R. leucodactylus* proveniente de un bosque siempre verde montano bajo al sureste de los Andes de Ecuador, a una altitud de 2164 m. Este reporte proporciona el registro más alto conocido para la especie y una nueva localidad en el sureste de Ecuador.

Palabras clave: Andes, distribución, elevación, Morona Santiago Sigmodontinae, Tinajillas-Río Gualaceño



Editado por /
Edited by:
Diego F. Cisneros-
Heredia

Recibido /
Received:
2016/08/10

Aceptado /
Accepted:
2018/07/03

Publicado en línea /
Published online:
2018/10/18

El género *Rhipidomys* (Cricetidae: Sigmodontinae: Thomasomyini) cuenta actualmente con 23 especies distribuidas desde la península de Paraguaná en Venezuela y la parte oriental de Panamá hasta la provincia de Salta al noroeste de Argentina [1-2]. A lo largo de su distribución ocupa diferentes hábitats, desde bosques húmedos de tierras bajas hasta bosques alto andinos cerca del páramo [2-3]. En Ecuador, se han reportado dos especies del género *Rhipidomys*: la Rata Trepadora de Pies Blancos *Rhipidomys leucodactylus* (Tschudi, 1845) y la Rata Trepadora de Pies Anchos *R. latimanus* (Tomes, 1860) [2,4-5]. *Rhipidomys leucodactylus* se encuentra distribuida en las Guayanas, sur de Venezuela, norte y centro de Brasil, Ecuador, Perú y en el centro oeste de Bolivia [3-4]. En Ecuador ocurre en los bosques húmedos de tierras bajas del Pacífico, los bosques piemontanos de la Cordillera Occidental de los Andes, los bosques piemontanos y montanos de la Cordillera Oriental de los Andes, los bosques húmedos de tierras bajas de la Amazonía, entre 200 y 1600 m [6]. A pesar de su amplio rango de distribución, pocos registros se han reportado, incluyendo: San José, provincia de Orellana; Mera, provincia de Pastaza; Palora, provincia de Morona Santiago; Los Pozos, provincia de El Oro; Santo Domingo, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas; y, Achiotos y El Faique, provincia de Loja [2,7-8]. En esta publicación presentamos un nuevo registro de *R. leucodactylus* para el suroriente del Ecuador, que constituye la localidad a mayor altitud conocida para la especie.

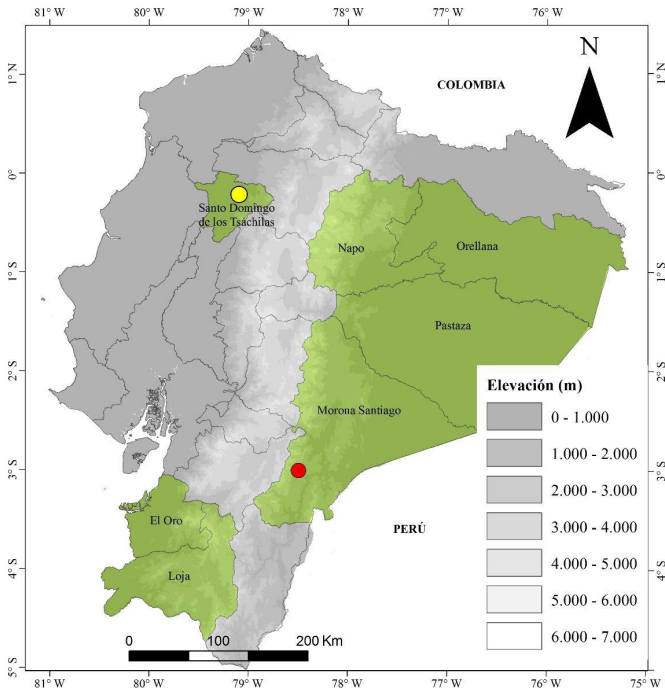


FIGURA 1. Distribución de *R. leucodactylus* en el Ecuador. En verde las provincias donde se ha reportado a la especie. El círculo amarillo representa a *R. equatoris*, sinónimo de *R. leucodactylus*, a 1600 m en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas [2]. El círculo rojo representa la nueva localidad aquí reportada en Tinajillas-Río Gualaceño, provincia de Morona Santiago.



El 24 de mayo de 2014, se registró un macho adulto de *R. leucodactylus* en el Área de Conservación Municipal Tinajillas-Río Gualaceño (3.00°S, 78.49°W; 2164 m), cantón Limón-Indanza, provincia de Morona Santiago. El espécimen fue hallado muerto en uno de los senderos que atraviesa un bosque montano alto primario de estribación, piso zoogeográfico Templado [9], estribación suroriental de la Cordillera de los Andes (Fig. 1). Este registro se realizó durante una investigación de anfibios, el espécimen posteriormente fue llevado al Museo de Zoología de la Universidad del Azuay (MZUA), donde fue preparado y depositado dentro de la colección mastozoológica con el código MZUA-MA171.

Algunos de los caracteres morfológicos externos que identifican al género *Rhipidomys* son: patas posteriores anchas con almohadillas plantares desarrolladas, un conjunto de pelos oscuros en el dorso; cola gruesa y peluda, a menudo con un mechón de pelos terminales de longitud variable; rostro corto con ojos grandes y vibras mistaciales largas que sobrepasan las puntas de las orejas cuando se extienden hacia atrás [1]. A continuación se describen las principales características morfológicas y las medidas morfométricas se presentan en la Tabla 1. El espécimen es de tamaño grande y contextura robusta, el pelaje dorsal es un poco áspero de color amarillo rojizo con la base gris oscura y algunos pelos de color negro entremezclados, en la región ventral el pelo es de color blanco con la base gris pálida, en no más de 3 mm. Las orejas son evidentes y desnudas, con pelos de color ocre alrededor de la base. La cola es larga, sobrepasa 120% de la longitud de la cabeza y el cuerpo juntos, es de color negro uniforme con abundante pelaje y en la punta tiene un penacho que alcanza los 30 mm (Fig. 2C). Las patas posteriores son largas (Fig. 2A) y las anteriores cortas (2B), presentan almohadillas carnosas y desarrolladas que son características relacionadas con sus hábitos arborícolas [11], el pelaje dorsal de las patas traseras es negro y se torna blancuzco hacia la punta de los dedos (Fig. 2C). El cráneo es bastante robusto y con las crestas supraorbitales notorias (Fig. 3A-C), los incisivos superiores son de color anaranjado en la parte frontal (Fig. 3B) y los inferiores presentan un tono más claro. El cóndilo mandibular apenas sobrepasa la apófisis angular (Fig. 3D) y con la hileras maxilares superior e inferior largas en relación al cráneo (Fig. 3E-F). Las características de este espécimen coinciden con las referidas en *Mammals of South America Volume 2 Rodents* [2] dentro de rangos fenotípicos de coloración, forma y tamaño para la especie.

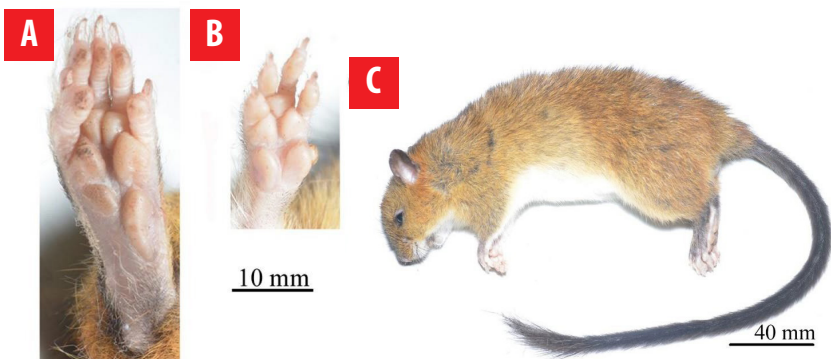


FIGURA 2. Especimen macho adulto de *Rhipidomys leucodactylus* (MAZUA-MA171) registrado en la localidad de Tinajillas-Río Gualaceño, provincia de Morona Santiago. **A** vista plantar de la pata posterior derecha, **B** vista plantar de la pata anterior derecha, **C** vista lateral del individuo.

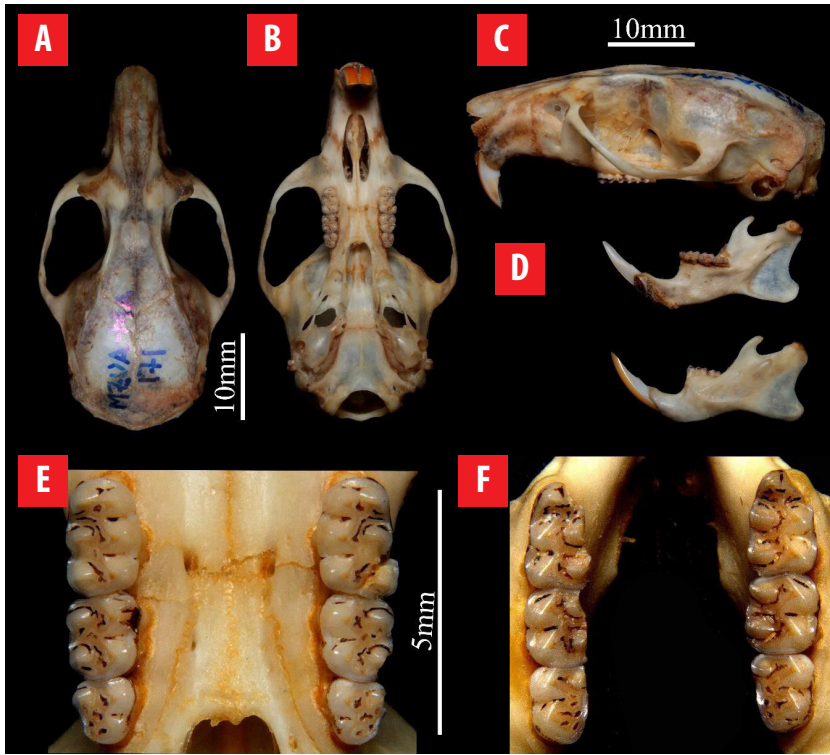


FIGURA 3. Cráneo del espécimen macho adulto de *Rhipidomys leucodactylus* (MAZUA-MA171) registrado en la localidad de Tinajillas-Río Gualaceño, provincia de Morona Santiago. **A** Vista dorsal, **B** Vista ventral, **C** Vista lateral, **D** Vista lateral interna y externa de la mandíbula derecha, **E** Vista de los molares superiores, **F** Vista de los molares inferiores.

TABLA 1. Medidas morfométricas del espécimen macho de *Rhipidomys leucodactylus* (MZUA-MA171) registrado en la localidad de Tinajillas-Río Gualaceño, provincia de Morona Santiago. Medidas tomadas con un calibrador digital marca Truper de 200 mm, siguiendo las especificaciones de Expedition Field Techniques [10]. Medidas promedio de la especie tomadas de Mamíferos del Ecuador [6].

Medida	Medidas (en mm) Especimen MZUA-MA171	Medidas (en mm) promedio para <i>R. leucodactylus</i>
Largo cabeza cuerpo	210	136–192
Largo cola	264	176–230
Largo oreja	22	17–23
Largo pata posterior (con uña)	37	29–38
Constricción interorbital	6,1	–
Hilera maxilar superior	6,9	–
Longitud de los huesos nasales	16,2	–
Ancho zigomático	23,3	–



Longitud orbital	13,6	—
Longitud diastema	11,6	—
Longitud foramen incisivo	7,8	—
Largo cráneo	43,1	—
Ancho cráneo	17,2	—

Rhipidomys latimanus, difiere externamente de *R. leucodactylus* por ser menos grande y robusta, con la cola bicolor y con un penacho usualmente de 10 mm (cola de color uniforme y con un penacho bien desarrollado ~ 40 mm en *R. latimanus*), y por no mostrar el pelaje dorsal de las patas blanquecino hacia la punta de los dedos (particularidad que sucede en *R. leucodactylus*). *Rhipidomys gardneri*, especie morfológicamente similar a *R. leucodactylus*, difiere por la coloración del pelaje ventral amarillento y con la base gris hacia la mitad de los pelos de la garganta y el pecho (pelaje ventral blanco en *R. leucodactylus*) y por el penacho de la cola no más allá de 6 mm [12].

Este registro extiende ~ 414 m el límite altitudinal superior de la especie, pues previamente la máxima altitud se había registrado hasta los 1750 m al este de Perú [2]. En el territorio ecuatoriano este espécimen representa una nueva localidad para la provincia de Morona Santiago y amplía el rango de distribución al sur oriente del país.

AGRADECIMIENTOS

A Verónica Urgilés y Cristian Nieves por realizar la colecta del individuo. A Juan Carlos Sánchez por su colaboración con la fotografías del cráneo y a la Universidad del Azuay por el apoyo logístico e infraestructura. A Jorge Brito por la información y revisión del espécimen. Este estudio fue apoyado por los fondos de investigación FONDOS UDA 2014 (Código 2014-08). El Museo de Zoología de la Universidad del Azuay está regido por la patente ambiental FAUS-UDA-MUSEO DE ZOOLOGÍA-003-2016.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Carlos Niveló-Villavicencio, Javier Fernández de Córdova y Pedro X. Astudillo revisaron e identificaron el espécimen, revisaron los registros de distribución, literatura especializada y escribieron el manuscrito.

REFERENCIAS

- [1] Voss, R. S., Lunde, D. P., & Simmons, N. B. (2001). The mammals of Paracou, French Guiana: a neotropical lowland rainforest fauna part 2. Nonvolant species. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 3-236.
- [2] Patton, J. L., Pardiñas, U. F., & D'Elia, G. (Eds.). (2015). *Mammals of South America, volume 2: rodents*. Chicago, United States of America: University of Chicago Press.
- [3] Tribe, C. J. (2005). A new species of Rhipidomys (Rodentia, Muroidea) from north-eastern Brazil. *Arquivos do Museu Nacional, Rio de Janeiro*, 63(1), 131-146.
- [4] Musser, G. G., & Carleton, M. D. (2005). Subfamily Sigmodontinae. *Mammal species of the world, a taxonomic and geographic reference*, 3, 1086-1185.
- [5] Tirira, D. G. (2016). *Mamíferos del Ecuador: lista actualizada de especies / Mammals of Ecuador: Updated checklist species. Versión 2016.1*. Asociación Ecuatoriana de Mastozoología y Fundación Mamíferos y Conservación. Quito. (actualización/updated: 2016-07-12). Recuperado de <https://www.mamiferosdeecuador.com/images/pdf/Lista12016.pdf>
- [6] Tirira, D. (2007). *Mamíferos del Ecuador: Guía de campo* (Vol. 6). Sangolquí, Ecuador: Ediciones Murciélagos Blanco.
- [7] Brito, J., y Ojala-Barbour, R. (2016). Mamíferos no voladores del Parque nacional sangay, Ecuador. *Papéis Avulsos de Zoología*, 56(5).
- [8] Boada, C., and Román, H. (2005). Evaluación ecológica rápida de la mastofauna en dos localidades de bosque seco en el occidente de la provincia de Loja. En Vásquez, M.A., Freire, J., y Suárez, L. (Eds.). *Biodiversidad en los Bosques Secos de la Zona de Cerro Negro-Cazaderos, al Occidente de la Provincia de Loja: un reporte de las evaluaciones ecológicas y socioeconómicas rápidas* (pp73-90). Quito, Ecuador: Ecociencia, MAE y Proyecto Bosque Seco
- [9] Albuja, L., y Arcos, R. (2011). Lista de mamíferos actuales del Ecuador. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- [10] Barnett, A., and Dutton, J. (1995). Small mammals. In *Expedition Field Techniques series*. London, United Kingdom: Expedition Advisory Centre, Royal Geographical Society.
- [11] de Camargo, N. F., Gonçalves, R. G., y Palma, A. R. T. (2008). Variação morfológica de pegadas de roedores arborícolas e cursoriais do Cerrado. *Zoologia*, 25(4).
- [12] Patton, J. L., Da Silva, M. N. F., & Malcolm, J. R. (2000). Mammals of the Rio Juruá and the evolutionary and ecological diversification of Amazonia. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 2000(244), 1-307.

Registro altitudinal inusual de Zorro Andino *Pseudalopex culpaeus* (Carnivora: Canidae) en el sureste de Ecuador

Leonardo Ordóñez-Delgado^{1*}, Catherine Vits², Ivonne González³, Darwin Valle⁴

¹ Laboratorio de Ecología Tropical y Servicios Ecosistémicos - EcoSs Lab, Departamento de Ciencias Biológicas – Universidad Técnica Particular de Loja. CP: 11-01-608, Loja, Ecuador

² Copalinga Ecolodge, Vía al Parque Nacional Podocarpus km 3. Zamora, Zamora Chinchipe – Ecuador.

³ Universidad Técnica Particular de Loja, Departamento de Ciencias Biológicas, Loja, Ecuador.

⁴ Programa de Maestría en Biología de la Conservación y Ecología Tropical. Departamento de Ciencias Biológicas - Universidad Técnica Particular de Loja.

*Autor para correspondencia/Corresponding author, e-mail: lyordonez2@utpl.edu.ec

Unusual altitudinal record of Culpeo *Pseudalopex culpaeus* (Carnivora: Canidae) in southeastern Ecuador

Abstract

We report an unusual altitudinal record of the Culpeo *Pseudalopex culpaeus* (Carnivora: Canidae) registered by trap cameras at 1353m in the southeastern Andean foothills at Copalinga Ecolodge, province of Zamora Chinchipe, Ecuador. This is the lowest altitudinal record documented for this species in the country and is the first report for a region where its presence was not previously evidenced. As reference associated information, we present the list of mammals from small to medium size registered in this locality.

Keywords: Canidae, New Distribution, Andean Foothills, Podocarpus National Park.

Resumen

Reportamos un registro altitudinal inusual de Zorro Andino *Pseudalopex culpaeus* (Carnivora: Canidae) obtenido con cámaras trampa a 1353m en el piedemonte suroriental andino, Copalinga Ecolodge, provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador. Este constituye el registro altitudinal más bajo de esta especie en el país y el primer reporte para una región en la que no existía evidencia previa de su presencia. Como información de referencia asociada, presentamos el listado de los mamíferos de pequeño a mediano tamaño registrados en esta localidad.

Palabras clave: Canidae, Distribución, Piedemonte Andino, Parque Nacional Podocarpus.



Editado por /
Edited by:
Diego F. Cisneros-
Heredia

Recibido /
Received:
2017/04/15

Aceptado /
Accepted:
2018/05/31

Publicado en línea /
Published online:
2018/10/23

El género *Pseudalopex* se considera endémico para el Neotrópico y comprende un conjunto de seis especies de cánidos sudamericanos de tamaño pequeño a mediano [1]. Dos de estas especies se encuentran en Ecuador: el Zorro Andino *Pseudalopex culpaeus* y el Zorro de Sechura *P. sechurae* [2].

El Zorro Andino posee una distribución amplia que abarca principalmente ecosistemas altoandinos desde el sur de Colombia hasta Argentina [2,3]. Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza UICN, esta especie se ubica en la categoría de Preocupación Menor (LC) a nivel global [4]. Sin embargo, la especie se considera como Vulnerable (VU) en Ecuador [5], principalmente debido a la pérdida y fragmentación del hábitat que ocupa, y a las presiones de cacería que enfrenta [5]. Se ha estimado que al menos el 58% del área de distribución histórica de la especie se encuentra disturbada [2]. El Zorro Andino habita en Ecuador los bosques templados y páramos andinos, entre los 2600 y 4810m de altitud, con pocos registros a 1660m en el valle del río Guayllabamba, provincia de Pichincha; y, en el sector de Guarumales, provincia del Azuay [2]. En esta publicación presentamos un registro inusual de Zorro Andino en la zona de amortiguamiento norte del Parque Nacional Podocarpus (PNP), en el piedemonte suroriental de los Andes.

Estos registros fueron logrados por medio de cámaras trampa, las mismas se colocaron de manera esporádica (sin un patrón definido), entre septiembre del 2011 y julio del 2016 a altitudes de entre 950 y 1450m en los senderos de Copalinga Ecolodge, cantón Zamora, provincia de Zamora Chinchipe. El sector corresponde a un bosque siempreverde montano bajo (vegetación de transición entre el bosque húmedo de tierras bajas y el bosque montano) [6]. Los árboles de la zona llegan a medir entre 30 y 40 m de altura, especies características del sitio son *Metteniusa tessmanniana* (Metteniusaceae), *Terminalia oblonga*, *Terminalia amazonia* (Combretaceae), *Guarea guidonia* (Meliaceae), *Oenocarpus bataua* y *Ceroxylon amazonicum* (Aracaceae) [6]. *Protium* sp (Bursaraceae) localmente conocida como copal, e *Inga* sp. (Fabaceae) son las especies de árboles más comunes en el sitio e inspiraron el nombre de la reserva [7]. El clima predominante en esta región se define como subtropical, con temperaturas anuales que fluctúan entre los 18 y 21°C y régimen pluviométrico súper húmedo, con más de 2000mm de precipitación anual, sin estación seca a lo largo del año [8].

Un individuo adulto de Zorro Andino fue grabado en video por 20 segundos a las 22h:34 del 28 de enero de 2014, en uno de los senderos de Copalinga Ecolodge a 1353m de altitud (−4,087° S, −78,967° O, WGS84). El video fue logrado con una cámara trampa Bushnell Trophy Cam HD ubicada a 1 m de altura, sin uso de cebo como atrayente. Esta cámara se programó para activarse por movimiento y tomar videos de 20 segundos y fotografías, permaneció activa las 24 horas del día, entre el 23 de diciembre del 2013 y el 04 de febrero del 2014, sumando un total de 44 días de muestreo. La grabación de video ha sido depositada en el archivo audio visual del Museo de Colecciones Biológicas de la Universidad Técnica Particular de Loja con el código (MUTPL-RA01) y en el repositorio en línea Figshare [9].

La identificación de la especie se realizó en base a las características descritas por Tirira [2] y la revisión de material fotográfico de la especie publicado en el portal Mamíferos del Ecuador [3]. Si bien la grabación del video es en blanco y negro, características distintivas



de la especie han permitido su identificación. El individuo grabado es un cánido de tamaño mediano, de cuerpo compacto, con pelaje tupido, la cola es abultada y de color más claro hacia la base y más oscura desde su parte media hasta la punta. En la nuca y la parte superior del dorso se evidencia una tonalidad más oscura que el vientre y la parte posterior de los brazos y muslos, sus orejas se ven algo pequeñas, erguidas y de forma triangular (Fig.1).



FIGURA 1. Fotograma extraído del video del Zorro Andino registrado en Copalinga Ecolodge en el piedemonte andino del sureste de Ecuador [6], el video completo puede ser observado en el enlace:

<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.4779745.v1>

La cota altitudinal más baja de distribución del Zorro Andino para el país se ha establecido en 2600m [2]. El registro aquí presentado se ubica a 1353m, es decir 1247m bajo la cota de referencia previa (Fig. 2). Este registro es el de menor altitud para la especie en Ecuador y el único que se ubica en el suroriente del país. El lugar más cercano en donde se ha observado a la especie es Cajanuma, cerca de los páramos del Parque Nacional Podocarpus (L. Ordóñez – Delgado obs. pers.), a 2800 m de altitud y 22 km (en línea recta) al oeste de Copalinga Ecolodge. Este registro evidencia que la presencia de bosques continuos entre la parte baja, media y alta de esta región, los cuales son parte del Parque Nacional Podocarpus influyen positivamente en la presencia y movilidad de diversas especies faunísticas en el sector.

Además del registro del Zorro Andino, en los senderos de Copalinga, se han logrado fotografías demás de 19 especies de mamíferos, entre pequeños y grandes (Tabla1), de los cuales hasta la actualidad se han identificado 14 especies en base a Tirira [2]. De este listado, destaca adicionalmente el registro de *Didelphis pernigra* a 1035m, es decir 465m bajo su rango de distribución altitudinal previamente conocido, el mismo que se establece entre 1500 y 4200m [2].

TABLA 1. Listado de mamíferos registrados en Copalinga Ecolodge, Zamora, Zamora Chinchipe, sureste de Ecuador, zona de amortiguamiento del Parque Nacional Podocarpus. Se presentan la altitud del registro en comparación a la altitud de referencia previamente conocida en el país en base a Tirira [2]

ORDEN Familia Especie	Registro Copalinga Ecolodge (en m sobre el nivel del mar)	Distribución altitudinal según Tirira [2] (en m sobre el nivel del mar)
CARNIVORA		
Canidae		
<i>Pseudalopex culpaeus</i>	1353	2600 a 4500
Felidae		
<i>Leopardus pardalis</i>	1065	0 a 1500
<i>Puma concolor</i>	1065	0 a 4500
<i>Herpailurus yagouaroundi</i>	1185	0 a 1800
Mustelidae		
<i>Eira barbara</i>	1015 / 1450	0 a 1550
Procyonidae		
<i>Bassaricyon alleni</i>	965	200 a 1600
<i>Nasua nasua</i>	1035	200 a 1550
DIDELPHIMORPHIA		
Didelphidae		
<i>Didelphis marsupialis</i>	1035	0 a 2000
<i>Didelphis pernigra</i>	1035	1500 a 3700
<i>Metachirus nudicaudatus</i>	965	50 a 1200
LAGOMORPHA		
Leporidae		
<i>Sylvilagus brasiliensis</i>	965	0 a 4800
PILOSA		
Myrmecophagidae		
<i>Tamandua tetradactyla</i>	1015	200 a 1650
PRIMATES		
Cebidae		
<i>Cebus yuracus</i>	1015	0 a 2000
RODENTIA		
Cuniculidae		
<i>Cuniculus paca</i>	1015	0 a 2000
Dasyproctidae		
<i>Dasyprocta fuliginosa</i>	1015	200 a 1600

El Parque Nacional Podocarpus, es un área protegida de significativa importancia para la región sur, pero con poca información publicada sobre los mamíferos que alberga y protege, tema aún pendiente para fortalecimiento de su gestión. La toma de



decisiones acertadas en cuanto a la conservación de especies, debe fundamentarse en el conocimiento adecuado de él o los objetos de interés, siendo uno de los puntos de partida fundamentales para el efecto, el tener clara su distribución geográfica. El registro aquí presentado sobre *Pseudalopex culpaeus*, corrobora que aún existen vacíos de información sobre diversos elementos de la especie, incluida su distribución dentro del país, de ahí la urgente necesidad de incrementar investigaciones sobre la misma [5] que abarquen entre otros, temas de su ecología, movilidad, tamaños poblacionales y más elementos que aporten a su conservación.

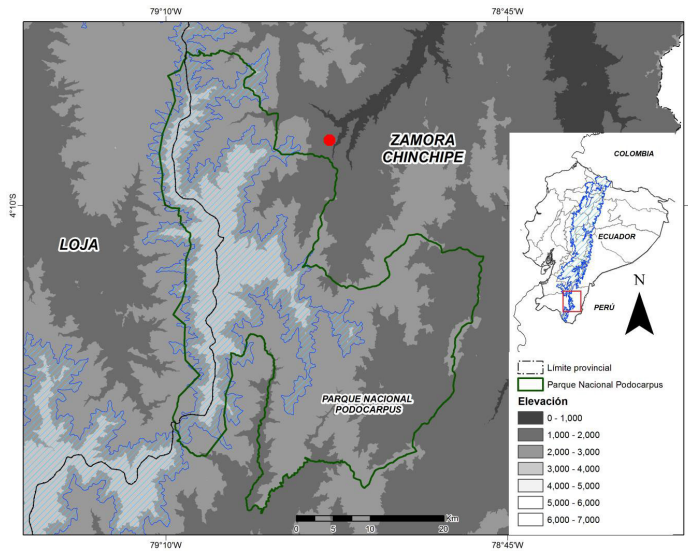


FIGURA 2. Mapa con la distribución potencial del Zorro Andino en Ecuador (área tramada) en base a Tirira [2], el punto rojo corresponde a la localidad de registro presentada en este documento.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Ciencias Biológicas de la Universidad Técnica Particular de Loja por el respaldo institucional. A Diego Tirira por la revisión del video y confirmación en la identificación de la especie. A los revisores del documento por sus valiosos aportes para la consolidación del mismo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Leonardo Ordóñez-Delgado redactó el manuscrito, Catherine Vits realizó el levantamiento de datos de campo, Ivonne González trabajó las figuras y Darwin Valle consolidó el listado final de especies. Todos los autores efectuaron la revisión crítica del contenido intelectual del documento.

REFERENCIAS

- [1] Patterson, B. D., and Costa, L. P. (Eds.). (2012). *Bones, Clones, and Biomes: The history and geography of Recent Neotropical mammals*. Chicago, United States of America: University of Chicago Press.
- [2] Tirira, D. G. (2017). *Guía de campo de los Mamíferos del Ecuador*. Sangolquí, Ecuador: Asociación Ecuatoriana de Mastozoología y Editorial Murciélago Blanco.
- [3] Vallejo, A. F., y Moscoso, G. (2018). *Pseudalopex culpaeus*. En Brito, J., Camacho, M.A., Romero, V., y Vallejo, A. F. (Eds.) *En Mamíferos del Ecuador (Versión 2018.0)*. Quito, Ecuador: Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperado de <https://bioweb.bio/faunaweb/mammaliaweb/FichaEspecie/Pseudalopex%20culpaeus>
- [4] Lucherini, M. (2016). *Lycalopex culpaeus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e. T6929A85324366. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-1.RLTS.T6929A85324366.en>
- [5] Zapata-Ríos, G., Tirira, D., Armijos, J., y Cisneros, R. (2011). Lobo de páramo (*Lycalopex culpaeus*). En Tirira, D. (Ed.) *Libro Rojo de los mamíferos del Ecuador*. 2da. edición. Versión 1 (2011). Quito, Ecuador: Fundación Mamíferos y Conservación, Pontificia Universidad Católica del Ecuador y Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- [6] Balslev, H., y Øllgaard, B. (2002). *Mapa de vegetación del sur de Ecuador*. In *Botánica Austroecuatoriana: Estudios sobre los recursos vegetales en las provincias de El Oro, Loja y Zamora-Chinchi* (pp. 51-64). Quito, Ecuador: Abya-Yala.
- [7] Solano-Ugalde, A., Ordóñez-Delgado, L., Vits, C., and Freile, J. F. (2018). Breeding biology of Gray Tinamou (*Tinamus tao*) in southeastern Ecuador. *The Wilson Journal of Ornithology*, 130(2), 427-436. doi: <https://doi.org/10.1676/16-229.1>
- [8] Lozano, P. (2002). Los tipos de bosque en el sur de Ecuador. En *Botánica Austroecuatoriana: Estudios sobre los recursos vegetales en las provincias de El Oro, Loja y Zamora-Chinchi* (pp. 29-49). Quito, Ecuador: Abya-Yala.
- [9] Ordóñez-Delgado, L. (2017). Video of Andean Fox in Copalinga, southeast of Ecuador. *Figshare*. doi: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.4779745.v1>

Sugerencias para la toma de datos en eventos de biología reproductiva de aves

Héctor Cadena-Ortiz

Aves Quito (Club de Observadores de Aves), Ecuador.

Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad, Calle Rumipamba 341 y Av. de los Shyris. Casilla 17-07-8976, Quito, Ecuador.

* Autor para correspondencia / Corresponding author, e-mail: fercho_cada@yahoo.es

Suggestions for data collection in bird biology reproductive events

Abstract

There is a major need to collect and publish information on the natural history of Ecuadorian birds. The vast majority of articles in this field are published in English. There remains a need to standardize the terms and types of data collected in the field. Here, I detail the considerations that should be taken when observing a reproductive event, to avoid overlooking any data, and making more complete comparisons. I also present different terms and their translations used in articles on this topic.

Keywords: Breeding biology, measures, terminology, types of nest, weights.

Resumen

Persiste la necesidad de generar y publicar información sobre la historia natural de las aves ecuatorianas. La mayoría de los artículos en este campo se publican en inglés. Surge la necesidad de estandarizar términos y datos tomados en campo. En el presente trabajo, detallo las consideraciones que se deberían tomar al momento de observar un evento reproductivo, para no pasar por alto ningún dato y poder realizar comparaciones más completas. También presento diferentes términos en inglés y en español usados en artículos sobre este tema.

Palabras clave: Biología reproductiva, medidas, pesos, terminología, tipos de nido.



Editado por/
Edited by:
Diego F. Cisneros-
Heredia

Recibido/
Received:
2016/04/30

Aceptado/
Accepted:
2018/07/06

Publicado en línea/
Published online:
2018/12/11

Si bien el número de estudios en biología reproductiva de aves en el Neotrópico ha aumentado, aún contrasta con el conocimiento más completo disponible en otras regiones, como Europa [1,2]. En el Neotrópico aún falta por describirse nidos de muchas especies o identificar si las descripciones realizadas son el patrón o la excepción. Además, se requiere comprender los parámetros de reproducción, evaluar si hay o no temporalidad, determinar la puesta usual de cada especie, y cómo esto se refleja en general en la dinámica de las poblaciones [3]. En las últimas décadas, el incremento del conocimiento de la biología reproductiva de las aves del Neotrópico, y en particular del Ecuador, ha tenido sustento en varias revistas regionales y globales, siendo las principales: *Ornitología Neotropical* y *Cotinga* [4]. Es así que entre 2014 y 2015, se publicaron 10 artículos sobre biología reproductiva de aves de Ecuador entre ambas revistas, todos en idioma inglés.

El Ecuador es un país megadiverso y un atributo importante de esta diversidad son las aves, representadas en el país por 1608 especies confirmadas y documentadas [5]. Sin embargo, para la mayoría de estas especies aún hay poca información sobre su biología reproductiva: comportamiento reproductivo, ritmos de incubación, alimentación de pichones, estacionalidad de nidificación y descripciones formales de sus nidos [6]. De todos los eventos de biología reproductiva en las aves (i.e. cortejo, cópula, acarreo de materiales para construcción de nidos, incubación, provisión de alimento para crías, cuidado parental, presencia de individuos con plumaje juvenil, u otros detalles del proceso de anidación), la mayoría de publicaciones en Ecuador se centran en descripciones casuales de nidos (e.g., [7-12]). Pocos son los trabajos que han dado un seguimiento exhaustivo a todo el proceso de nidificación (e.g., [13,14]) o que tienen datos de más de un nido para la misma especie (e.g., [15,16]).

Hay que destacar que artículos y notas cortas sobre historia natural continúan siendo necesarios, y una compilación de estos permitirá una mejor perspectiva de la biología reproductiva y la evolución de las especies [4]. Para tener una efectiva comparación entre datos reproductivos de las especies es necesaria una estandarización de términos y metodologías [17]. El presente trabajo tiene como objetivo estimular a investigadores y observadores de aves a la publicación de datos sobre biología reproductiva y que normalicen la toma de datos en encuentros fortuitos o búsquedas sistematizadas de cualquier tipo de evento de biología reproductiva.

Para este trabajo realicé una revisión general de artículos publicados en revistas indexadas, prioricé mi análisis en artículos más recientes y con énfasis en las aves del Neotrópico. Empleé en el motor de búsqueda Google Académico (<https://scholar.google.com>), palabras clave como "biología reproductiva", "nidos", "aves" y sus respectivas traducciones en inglés. Revisé las metodologías empleadas en los artículos, compilando, junto con mis sugerencias, los datos que deberían ser considerados para registrar un evento reproductivo de la manera más completa posible. Finalmente extraigo los términos habitualmente empleados en los manuscritos, tanto en inglés como en español, y elaboro una definición en base al contexto de los artículos.

La información que se puede obtener en el campo sobre la biología reproductiva de las aves es muy amplia. Detalles puntuales que no requieren más que una atenta observación, pueden proporcionar información valiosa (e.g., primeras descripciones de nido para una especie [12, 15], la compilación de eventos reproductivos de una región



que da indicios de la temporalidad [7], o el reporte de anidación de especies cuya reproducción se desconocía en el país [10]).

Ante el encuentro de cualquier evento reproductivo es importante anotar datos básicos: (i) la identificación de la especie, (ii) la localidad, (iii) la fecha, (iv) la descripción geográfica y ecológica del sitio. En caso de tratarse de un nido se debe incluir una descripción de la estructura en donde este se ubica (e.g., en la copa de un árbol, sobre una estructura construida por humanos, adherido a una planta, etc.). Siempre es útil una fotografía o esquema del nido y fotografías detalladas de la planta a la que está adherida el nido para confirmar la identificación de la misma.

Entre las herramientas importantes para tomar datos de eventos de biología reproductiva están: receptor de sistema de posicionamiento global (conocido por su acrónimo en inglés GPS), cinta métrica (en el campo con una regla pequeña se puede colocar marcar en un palo para medir la altura de un nido que está fuera de alcance, o se puede usar el brazo del investigador para referenciar alturas o profundidades de cavidades), calibrador (para las medidas de nidos huevos y aves, detalladas más adelante), balanza o pesolas, cámara fotográfica (el temporizador de la cámara puede ser muy útil para nidos fuera de alcance, programando al mayor lapso y sujetándola a un palo para llegar al nido) y brújula.

Para las fotografías tomadas en campo es muy útil una cartilla que nos indique la relación de tamaño y de color del objeto fotografiado. Adicionalmente una referencia de la orientación geográfica, que pueda ser posicionada con la brújula, permitirá indicar la dirección de entrada del nido o la ubicación de los huevos. El color puede ser subjetivo al observador o la cantidad de luz del momento, por ello en la cartilla de referencia que sugiero (fig. 1) incluyo la lámina de color de Encycolorpedia (<http://encycolorpedia.es/>), donde independientemente de la coloración de la imagen impresa o en pantalla, en la fotografía se podrá ubicar la posición en la lámina más similar al objeto fotografiado (e.g., un huevo), posteriormente en <http://encycolorpedia.es/> se debe seleccionar con el cursor, la misma ubicación escogida para obtener la descripción del color.

En el trabajo con seres vivos, la ética del investigador es primordial, por ello la toma de datos debe ser muy cuidadosa y consciente, procurando afectar en lo mínimo el desarrollo natural de los eventos, por ejemplo no tratar de rescatar a un juvenil fuera del nido, lo más probable es que esté aprendiendo a volar y sus progenitores estén cerca. La toma de datos de huevos y pichones debe realizarse en ausencia de los progenitores, se sugiere que ante los llamados de alerta, el investigador no debería estar presente por más de 5 minutos [18]. La periodicidad de la toma de datos debe ser considerada por el investigador en función del estrés que se genere en los progenitores. MacIvor et al. [19] encontraron que el monitoreo diario de nidos de *Charadrius melodus*, no incrementó el riesgo de depredación, sin embargo sugieren que cada visita a los nidos sea desde la mayor distancia y el menor tiempo posibles. Hay evidencias que el disturbio de los investigadores en los nidos no necesariamente involucra efectos negativos en el éxito de reproductivo, incluso algunos predadores se han mostrado más sensibles que las especies estudiadas [20], pero toda precaución es necesaria para minimizar el impacto.

Considerando que las colecciones aún son necesarias, en particular en el Neotrópico [21] y que los huevos y nidos están pobremente representados en los museos

nacionales (obs. pers.); es importante realizar colecciones (con los respectivos permisos legales) porque son una gran fuente de información y permiten el desarrollo de diversos estudios [22]. La mayor cantidad de información colectada, registrada con fotografías o descrita en la libreta de campo, permitirá una correcta descripción y comparación con datos previamente publicados de los eventos de biología reproductiva. A continuación detallo algunas variables a considerar:

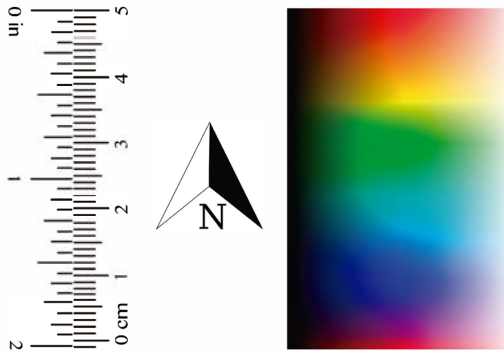


FIGURA 1. Sugerencia de cartilla de referencia para medida, color (Encycolorpedia) y norte magnético, para la toma de fotografías de nidos, huevos o pichones.

FORMA DEL NIDO

Simon y Pacheco [17] proponen nomenclaturas para varios tipos de nidos, que se agrupan en cuatro principales que se describen a continuación:

1. Simple: sin una estructura notoria, se pueden identificar dos: desnudo (*unlined*): cuando los nidos están en el suelo, aun si hay una leve excavación o limpieza en el área; y plataforma (*platform*): cuando algo de material ha sido apilado o vagamente entrelazado, incluso sobre agua.

2. Taza o copa (*cup*): cuando se asemeja a un recipiente, es importante notar cómo está soportada, si desde la base o lateralmente y a cuántas ramas o plantas está sujeta. También puede ser nombrado como nido abierto (*open nest* [23]) y ser voluminoso (*bulky*) o de poca profundidad (*shallow / low*).

3. Cerrado (*closed*): cuando existen paredes que albergan completamente la cámara de incubación; hay que considerar su forma e igualmente desde donde está soportada. A esta forma de nidos pertenecen los tipo bolsa (*pouch-like nests*), característicos de algunos Icteridos [24].

4. Cavidad (*cavity*): cuando los huevos son depositados dentro de las cavidades naturales o artificiales. Por ejemplo es común entre alguna aves como los trogones, usar los termiteros (*termitaria / termite nest*) para sus nidos [12]. Para este tipo de nidos es importante considerar la presencia o no de un túnel de acceso, su longitud y orientación; un espejo bucal y una linterna podrían ser muy útiles para visualizar el contenido.

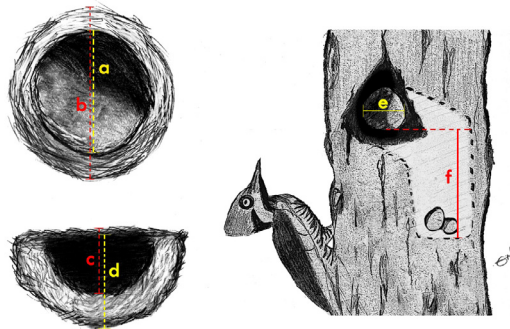


FIGURA 2. Medidas sugeridas para considerar en un nido: a) diámetro interno, b) diámetro externo, c) profundidad, d) altura, e) diámetro de la entrada, f) profundidad de cavidad (Ilustraciones: Eliana Montenegro).

ENTORNO DEL NIDO

Knowlton [25] propone, para un detalle completo del entorno del nido, considerar en un radio de cinco metros a partir del nido y registrar todas las especies vegetales, su diámetro a la altura del pecho (DBH), el tamaño de la copa del árbol donde se encontró el nido, la orientación del nido, su distancia al follaje, distancia al tronco, número de ramas que soportan el nido, el diámetro de estas y el porcentaje de cobertura sobre el nido.

COLOR DEL HUEVO

El cascarón del huevo de un ave está formado principalmente por carbonato de calcio, de color blanco al ojo humano; la variación del color se da por la interacción de las propiedades físicas y químicas del cascarón y por la presencia de dos pigmentos: biliverdinas (tonalidades azul-verde) y protoporfirinas (colores oxidados, de amarillo a rojo a marrón) [26]. Es importante una clara descripción del color y manchas de los huevos (fig. 4), para esto una fotografía puede ser muy útil y más aún si tiene de fondo una cartilla de referencia de color e. g. (fig. 1).

MEDIDAS

Nido: dependiendo del tipo de nido se pueden considerar medir diferentes ejes [17], para la mayoría de tipos, aplicaría considerar la distancia desde el suelo al borde inferior de la entrada del nido, su diámetro interno y externo, altura y profundidad. En caso de los nidos en cavidades: diámetro de la entrada y profundidad de la cavidad desde el borde inferior de la entrada al piso de la cavidad e. g. [14-16] (fig. 2).

Huevos: largo y ancho mayor; hay que ser muy cuidadosos si se remueven los huevos del nido, tratarlos con precaución y dejarlos en el mismo sitio y posición que fueron tomados. Skutch [23] menciona que en todos sus muestreos midió los huevos sin sacarlos del nido. Incluso el toparlos con el calibrador podría generar fisuras, por lo que es mejor tomar las longitudes dentro del nido y con una cinta o hilo, al cual después se lo pueda medir o fotografiarlos con una referencia de medida y posteriormente establecer sus dimensiones en la computadora.

Aves: se puede tomar varias medidas morfométricas tanto a adultos como a juveniles y polluelos. Winker [27] sugiere considerar: longitud del pico (desde el borde anterior del nostrillo a la punta); longitud de la cuerda de ala; longitud de la cola (insertando una regla con tope en cero, en medio de las rectrices centrales) y longitud tarsometatarso (fig. 3).

Pesos

Es importante registrar periódicamente los pesos de los huevos, ya que estos van perdiendo peso desde su puesta [8], mientras que su volumen y dimensiones no cambian durante la incubación [28]. También se puede considerar un registro periódico del peso de los pichones [29]. Una vez finalice el proceso de nidificación, puede tomarse el peso seco del nido, también disgregarlo y pesar cada material [11].

Fenología

Se puede registrar las fechas más significativas: desde la construcción del nido hasta la independencia de las crías para establecer los períodos reproductivos; anotar día y hora de puesta y eclosión de cada huevo, de abandono del nido y días de permanencia con los padres. También se puede registrar el desarrollo del plumaje que tienen los polluelos, realizando una descripción de cómo está el plumaje después de la eclosión, citando en que día empieza a aparecer los cañones y en qué zonas del cuerpo, cuándo las plumas rompen los cañones y describiendo la coloración de las plumas en contraste con el plumaje de adulto [29]; una vez alcanzado el plumaje juvenil se desarrollan diferentes mudas que están vinculadas con aspectos de su ciclo de vida, como la reproducción, el suministro de alimentos o la migración; generándose plumajes nupciales o de verano o reproductivos [30,31].

Ecología

Varios datos pueden ser muy útiles para visualizar diferencias regionales entre las especies o patrones entre las familias. En este contexto se podría considerar: la dedicación de cada sexo en la construcción del nido, incubación y acarreo de alimento a pichones [9], especificando la frecuencia de cada actividad (el número de veces) y la duración de cada actividad, que se puede expresar como el porcentaje entre el tiempo dedicado a cada actividad sobre el total del tiempo de observación [32]. En el acarreo de alimento se puede considerar los ítems entregados y si estos porcentajes van cambiando con el tiempo, para un detalle más específico de la dieta de la especie. Se puede notar también si los modos en que los adultos entran o salen del nido tienen un patrón específico o no [33], pueden presentar estrategias discretas para evadir depredadores. Para obtener este tipo de información pueden ser muy útiles las cámaras trampa [34]; para especies que no presentan evidente dimorfismo sexual, el sexado molecular y marcaje con anillas resulta óptimo [35].

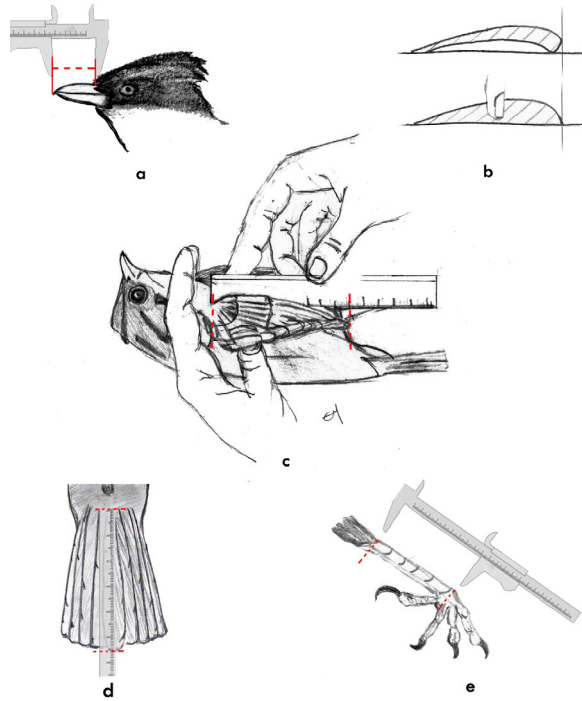


FIGURA 3. Medidas morfométricas sugeridas a) longitud del pico; b) longitud de la cuerda de ala [superior], longitud del ala plana [inferior], vista frontal; c) longitud de la cuerda de ala, vista lateral; d) longitud de la cola; e) longitud tarsometatarso (Ilustraciones: Eliana Montenegro).

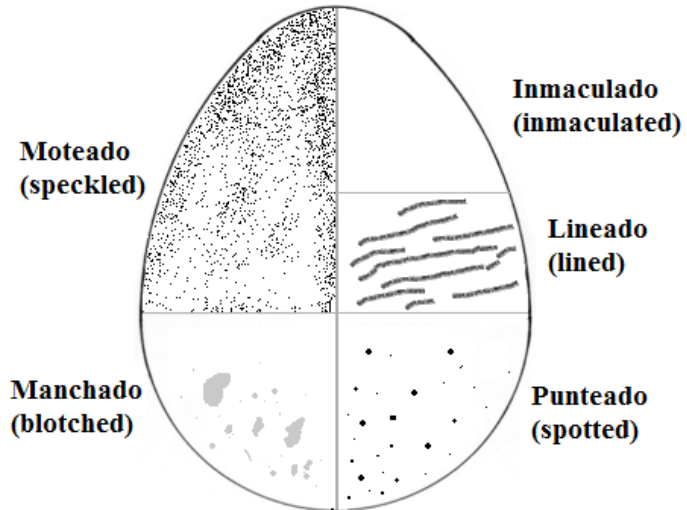


FIGURA 4. Nombres de patrones en huevos con sus traducciones en inglés entre paréntesis

GLOSARIO

De los trabajos revisados para el presente manuscrito recabo los términos frecuentemente empleados, sugiriendo su correspondiente traducción y definición:

Ahuyentar (*flushed*): Cuando una persona pasa cerca de un ave y esta se asusta y huye; en ocasiones esto permite evidenciar el nido.

Bolsas fecales (*fecal sacs*): Son los desechos de los polluelos, que habitualmente son retirados del nido por los progenitores.

Centinela (*sentinel*): es la actividad de vigilancia de un miembro de la pareja, desde una percha cercana, emitiendo llamados de alerta ante cualquier amenaza para que la pareja escape o se prepare para proteger el nido.

Comisuras (*gapes*): Uniones en la base del pico que en los pichones usualmente son muy pronunciadas y de colores claros, para que los padres sean más eficientes al alimentarlos.

Descendencia (*offspring*): el resultado de la reproducción de una pareja de aves van tomando los siguientes nombres de acuerdo a sus clases de edad, en el siguiente orden: pichón, juvenil, inmaduro y subadulto.

Diente de huevo (*egg-tooth*): Prominencia calcárea presente en la mayoría de pichones, ubicada en la punta del pico para romper la cáscara del huevo al final del periodo de incubación.

Eclosión (*hatching*): Momento en el que el pichón sale del huevo.

Inmaduro (*immature*): descendencia de las aves considerada posterior al periodo de dependencia y cuando ha perdido su plumaje juvenil

Juvenil o volantón (*juvenile / fledgling*): descendencia de las aves considerada desde que fugan del nido, es decir abandonan el nido por sus propios medios, hasta que se independizan del cuidado parental.

Muda (*molting*): proceso de pérdida natural de plumas y su subsecuente crecimiento de nuevas, por el cual se alcanzan los diferentes plumajes, e. g. plumaje juvenil, plumaje reproductivo.

Nidada (*broods*): Número de descendientes o aves eclosionadas.

Nidifugo (*precocial*): cuando el pichón nace con estado de desarrollo avanzado, que le permite movilizarse y auto regular su temperatura; nacen con los ojos abiertos y plumas a lo largo de sus alas y plumón en su cuerpo.

Nidícola (*altricial*): cuando el pichón salen del huevo sin estar completamente desarrollado, sin plumas y ojos cerrados.



Nido (*nest*): Estructuras para incubar huevos y criar polluelos, y en algunas especies pueden tener un uso secundario como refugio [36].

Nido comunal (*communal nest*): cuando varias hembras depositan sus huevos en una misma estructura.

Período de atención al nido (*nest attentiveness*): Tiempo que el adulto emplea incubando, empollando y alimentando (*provisioning*) en el nido, no incluye el tiempo que los adultos pasan en las cercanías del nido [32].

Período de construcción del nido (*nest-building*): desde que el o los adultos empiezan con el acarreo de material hasta que se desova el primer huevo.

Período de dependencia (*dependency period*): Tiempo desde que eclosiona el primer pichón hasta que toda la descendencia se independizan del cuidado parental.

Período de empollamiento (*brooding / nestling*): Tiempo desde que los adultos calientan o cubren a los pichones hasta que el último pichón vuela del nido.

Período de incubación (*incubation*): Tiempo en que los adultos calientan los huevos desde que el último huevo fue puesto hasta que todos hayan eclosionado.

Período de puesta (*laying*): Tiempo desde que la hembra desova el primer huevo hasta el último.

Pichón (*nestling / chick*): descendencia de las aves considerada desde que eclosionan los huevos hasta que fugan del nido.

Plumón (*down feathers*): Plumas de gran superficie pero poca masa lo que les provee suavidad y permite brindar abrigo, constituyen el primer plumaje de los polluelos.

Subadulto (*subadult*): descendencia de las aves considerada posterior al periodo de dependencia y cuando su plumaje ya es de adulto pero aún no bien definido.

Tamaño de puesta (*clutch size*): Número de huevos puestos por una hembra en el nido.

Temporadas de cría (*breeding seasons*): Épocas en las que hay picos de reproducción en las aves; más marcado en las zonas templadas que en los trópicos.

Vainas o cañones (*feather sheaths / pin feather / blood feather*): La pluma aun envuelta cuando recién emerge de la piel.

Vuelo de amague (*flyby*): Comportamiento en el que un miembro de la pareja vuela hacia el nido e ingresa, al mismo tiempo que el otro miembro también se dirige al nido, cruzando el sendero del primero y provocando un breve y confuso destello de alas y movimiento, podría ser una estrategia para distraer a los depredadores [37].

La información detallada anteriormente tiene como objetivo que investigadores puedan disponer de elementos para incrementar y optimizar la toma de datos y posterior análisis con la finalidad de estandarizar el conocimiento en esta interesante rama de la ornitología. Finalmente, la conservación de las especies depende de un conocimiento adecuado de su historia natural, especies amenazadas podrían incrementar su población con una adecuada protección de sus áreas de anidación o la implementación de cajas nido, para cualquier alternativa es necesario un conocimiento previo claro.

AGRADECIMIENTOS

Este manuscrito se vio enriquecido por los comentarios de Carles Barriocanal, Jorge Brito, Tjitte de Vries y revisores anónimos a quienes les agradezco; también por la paciente ayuda con las figuras a Eliana Montenegro.



REFERENCIAS

- [1] Baillie, S. R. (1990). Integrated population monitoring of breeding birds in Britain and Ireland. *Ibis*, 132(2), 151-166. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1474-919X.1990.tb01035.x>
- [2] Xiao, H., Hu, Y., Lang, Z., Fang, B., Guo, W., Zhang, Q., ... and Lu, X. (2017). How much do we know about the breeding biology of bird species in the world?. *Journal of Avian Biology*, 48(4), 513-518. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/jav.00934>
- [3] Marini, M. Â., Borges, F. J., Lopes, L. E., Sousa, N. O., Gressler, D. T., Santos, L. R., ... and França, L. F. (2012). Breeding biology of birds in the Cerrado of central Brazil. *Ornitología Neotropical*, 23, 385-405. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/133324>
- [4] Freile, J. F., Greeney, H. F., and Bonaccorso, E. (2014). Current Neotropical ornithology: research progress 1996–2011. *The Condor: Ornithological Applications*, 116(1), 84-96. doi: <http://dx.doi.org/10.1650/CONDOR-12-152-R1.1>
- [5] Nilsson, J., Freile, J. F., Ahlman, R., Brinkhuizen, D. M., Greenfield, P. J., and Solano-Ugalde, A. (2014). Rare birds in Ecuador: Second annual report of the Committee for Ecuadorian Records in Ornithology (CERO). *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(2), B38-B50. doi: <http://dx.doi.org/10.18272/aci.v6i2.178>
- [6] Cadena-Ortiz, H. F. (2018). Sugerencias para la toma de datos en eventos de biología reproductiva de aves. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 10(1). Recuperado de https://www.usfq.edu.ec/publicaciones/archivosacademicos/Documents/archivos_academicos_003.pdf
- [7] Greeney, H. F., Martin, P. R., Gelis, R. A., Solano-Ugalde, A., Bonier, F., Freeman, B., and Miller, E. T. (2011). Notes on the breeding of high-Andean birds in northern Ecuador. *Bulletin of the British Ornithological Club*, 131, 24-31.
- [8] Greeney, H. F. (2006). The nest, eggs, and nestlings of the Rufous-headed Pygmy-Tyrant (*Pseudotriccus ruficeps*) in southeastern Ecuador. *Ornitología Neotropical*, 17, 589-592. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/119796>
- [9] Skutch, A. F. (1947). A nesting of the plumbeous kite in Ecuador. *The Condor*, 49(1), 25-31. doi: <http://dx.doi.org/10.18272/aci.v10i1.297>
- [10] Pozo-Zamora, G. M., Batallas, D., Echeverría-Vaca, G., & Garzón, C. (2015). Observaciones sobre el Zambullidor Grande Podiceps major (Aves: Podicipedidae) en Ecuador, con el primer registro de anidación y la descripción de vocalizaciones. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7(1). doi: <http://dx.doi.org/10.18272/aci.v7i1.220>
- [11] Freile, J. F. (2016). Nesting of the Scrub Tanager (*Tangara vitriolina*) in Andean Ecuador. *Ornitología Neotropical*, 26(1), 51-58. Recuperado de <http://journals.sfu.ca/ornneo/index.php/ornneo/article/view/12/>
- [12] Greeney, H. F., & Cadena-Ortiz, H. (2016) First nest description for Amazonian Trogon Trogon ramonianus, from eastern Ecuador, and a review of breeding data for Green-backed Trogon T. viridis. *Cotinga*, 38, 41-42. Recuperado de <http://www.neotropicalbirdclub.org/wp-content/uploads/2016/02/Greeney-Cadena-Ortiz.pdf>
- [13] De Vries, T. (1975). The breeding biology of the Galapagos Hawk, *Buteo galapagoensis*. *Le Gerfaut*, 65, 29-57.
- [14] Greeney, H. F., Kirwan, G. M., & Miller, E. T. (2012). Nesting biology of the Long-wattled Umbrellabird *Cephalopterus penduliger*. *Part II: nestling provisioning*. Recuperado de <http://www.neotropicalbirdclub.org/articles/34/Greeney2.pdf>
- [15] Durães, R., Greeney, H., & Hidalgo, J. R. (2008). First description of the nest and eggs of the Western Striped Manakin (*Machaeropterus regulus striolatus*), with observations on nesting behavior. *Ornitología Neotropical*, 19(2), 287-292. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/133428>
- [16] Juíña, M. E., Harris, J. B. C., Greeney, H. F., & Hickman, B. R. (2010). Descripción del nido y cuidado parental de la Estrellita Esmeraldeña (*Chaetocercus berlepschi*) en el occidente del Ecuador. *Ornitología Neotropical*, 21(3), 313-322. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/133173>
- [17] Simon, J. E., and Pacheco, S. (2005). On the standardization of nest descriptions of neotropical birds. *Revista Brasileira de Ornitología*, 13(2), 143-154. Recuperado de <http://www.faanaparaguay.com/Sim13.pdf>
- [18] Martin, T. E., and Geupel, G. R. (1993). Nest-Monitoring Plots: Methods for Locating Nests and Monitoring Success (Métodos para localizar nidos y monitorear el éxito de estos). *Journal of field Ornithology*, 507-519. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/51838>

- [19] MaCivior, L. H., Melvin, S. M., and Griffin, C. R. (1990). Effects of research activity on piping plover nest predation. *The Journal of Wildlife Management*, 443-447. doi: <http://dx.doi.org/10.2307/3809656>
- [20] Ibáñez-Álamo, J. D., Sanllorente, O., and Soler, M. (2012). The impact of researcher disturbance on nest predation rates: a meta analysis. *Ibis*, 154(1), 5-14. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1474-919X.2011.01186.x>
- [21] Vuilleumier, F. (1998). The need to collect birds in the Neotropics. *Ornitologia Neotropical*, 9(2), 201-203. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/119303>
- [22] Green, R. E., & Scharlemann, J. P. (2003). Egg and skin collections as a resource for long-term ecological studies. *Bulletin-British Ornithologists Club*, 123, 165-176.
- [23] Skutch, A. F. (1954). *Life histories of Central American birds: families Fringillidae, Thraupidae, Icteridae, Parulidae and Coerebidae* (No. 598.29728 S629). Berkeley, United States of America: Cooper Ornithological Society.
- [24] Robinson, S. K. (1985). The Yellow-rumped Cacique and its associated nest pirates. *Ornithological Monographs*, 898-907. doi: <http://dx.doi.org/10.2307/40168323>
- [25] Knowlton, J. L. (2010). Breeding records of birds from the Tumbesian region of Ecuador. *Ornitologia Neotropical*, 21(1), 109-147. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/133152>
- [26] Hanley, D., Grim, T., Cassey, P., and Hauber, M. E. (2015). Not so colourful after all: eggshell pigments constrain avian eggshell colour space. *Biology Letters*, 11(5), 20150087. doi: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0087>
- [27] Winker, K. (1998). Suggestions for measuring external characters of birds. *Ornitologia Neotropical*, 9, 23-30. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/119282>
- [28] Hoyt, D.F. (1979). Practical methods of estimating volume and fresh weight of bird eggs. *The Auk*, 96(1), 73-77. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/23238>
- [29] Greeney, H. F. (2008). Nestling growth and plumage development of the Spotted Barbtail (*Premnoplex brunnescens*). *Kempffiana*, 4(1), 21-29.
- [30] Howell, S. N., Corben, C., Pyle, P., and Rogers, D. I. (2003). The first basic problem: a review of molt and plumage homologies. *The Condor*, 105(4), 635-653. doi: <http://dx.doi.org/10.1650/7225>
- [31] Humphrey, P. S., and Parkes, K. C. (1959). An approach to the study of molts and plumages. *The Auk*, 76(1), 1-31. doi: <http://dx.doi.org/10.2307/4081839>
- [32] Wetherell, E., Greeney, H. F., and Port, J. (2015). Breeding biology of speckled hummingbird *Adelomyia melanogenys* in eastern Ecuador. *Cotinga*, 37, 43-6. Recuperado de <http://www.neotropicalbirdclub.org/wp-content/uploads/2015/03/Wetherell-et-al.pdf>
- [33] Greeney, H. F., McLean, A., Búcker, A. D., Gelis, R. A., Cabrera, D., and Sornoza, F. (2006). Nesting biology of the long-wattled Umbrellabird (*Cephalopterus penduliger*). Part I: incubation. *Ornitol. Neotrop.*, 17, 395-401. Recuperado de <https://sora.unm.edu/node/119773>
- [34] King, D. I., DeGraaf, R. M., Champlin, P. J., and Champlin, T. B. (2001). A new method for wireless video monitoring of bird nests. *Wildlife Society Bulletin*, 349-353. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/3784019>
- [35] Greeney, H. F., Dyrce, A., Mikusek, R., and Port, J. (2015). Cooperative breeding at a nest of Slaty-backed Nightingale-Thrushes (*Catharus fuscater*). *The Wilson Journal of Ornithology*, 127(2), 323-325. doi: <https://doi.org/10.1676/wils-127-02-323-325.1>
- [36] Skutch, A. F. (1961). The nest as a dormitory. *Ibis*, 103(1), 50-70. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1474-919X.1961.tb02420.x>
- [37] Wright, Z., Port, J., and Greeney, H. F. (2017). Male and female parental care in the Golden-rumped Euphonia (*Euphonia cyanocephala*). *Ornitologia Colombiana*, 16. Recuperado de <http://asociacioncolombianadeornitologia.org/wp-content/uploads/2018/10/16eNB0701-06.pdf>

Nuevos casos de leucismo en peces andinos del género *Astroblepus* (Siluriformes: Astroblepidae)

Fernando Anaguano-Yancha^{1,2}

¹ AmbienConsul, Av. 10 de agosto 695 y Riofrío, Edif. Benalcázar Mil, Quito, Ecuador.

² Dirección actual Wildlife Conservation Society, Ecuador Program, Quito 170501, Ecuador.

*Autor para correspondencia / Corresponding author, e-mail: fernando_anaguano@hotmail.com

New records of leucism in Andean fish of the genus *Astroblepus* (Siluriformes: Astroblepidae)

Abstract

The South American ichthyofauna is the most diverse in the world, however, it is the least studied. For example, there are few reports of pigmentation anomaly in freshwater fishes, especially in high Andean species. This study reports two new cases of leucism in two species of the genus *Astroblepus* (Siluriformes: Astroblepidae). The individuals presented depigmentation in all body, except in the ocular iris, caudal peduncle, dorsal and caudal fins. Possibly, inbreeding and habitats contamination are causing stress in these fish populations, enhancing the appearance of this aberration.

Keywords: Freshwater fishes, Siluriformes, Pigmentation anomaly, Contamination of habitats.

Resumen

La ictiofauna Sudamericana es la más diversa del mundo, sin embargo, es también la menos estudiada. Por ejemplo, son escasos los reportes de casos de aberraciones pigmentarias en peces dulceacuícolas, especialmente en especies altoandinas. Este estudio reporta dos nuevos casos de leucismo en dos especies del género *Astroblepus* (Siluriformes: Astroblepidae). Los individuos presentaron despigmentación en casi todo el cuerpo, excepto en el iris ocular, pedúnculo caudal, aletas dorsales y caudales. Posiblemente, la endogamia y la contaminación de sus hábitats estén causando estrés en estas poblaciones de peces, potenciado la aparición de esta aberración.

Palabras clave: Peces dulceacuícolas, Siluriformes, Aberraciones pigmentarias, Contaminación de hábitats.



Editado por /
Edited by:
Diego F. Cisneros-
Heredia

Recibido /
Received:
2017/09/18

Aceptado /
Accepted:
2018/11/25

Publicado en línea /
Published online:
2018/12/11

La coloración tegumentaria en los peces es producida por los cromatóforos, que incluyen a los melanóforos, xantóforos, eritróforos, leucóforos e iridóforos [1]. La carencia de pigmento tegumentario causa coloraciones anormales en los peces, y de acuerdo con las características fenotípicas de los individuos, se denominan albinismo, leucismo, melanismo, xantismo, ambicoloración, metacromismo y policromismo [2-5]. El leucismo es atribuido a la mutación de genes recesivos en el desarrollo embrionario, lo cual, inhibe la migración de melanoblastos (células productoras de pigmentos) de la cresta neural a la capa basal de la epidermis [6,7]. Generalmente se manifiesta en los organismos por la ausencia total o parcial de la pigmentación en la piel, pero una pigmentación normal de las retinas [8-10]. Sin embargo, en muchos casos, la etiología de las aberraciones cromáticas no está clara y varios factores, incluyendo mutaciones genéticas no patológicas, aislamiento poblacional, estrés ambiental y la exposición a metales pesados pueden estar implicados en el surgimiento de estas anomalías [11-13].

En peces dulceacuícolas sudamericanos se ha reportado casos de aberraciones pigmentarias en especies de las familias Erythrinidae, Lebiasinidae, Doradidae, Pimelodidae, Callichthyidae, Loricariidae, Atroblepidae, Gymnotidae y Lepidosirenidae [14-17]. Entre las especies de la familia Astroblepidae, un grupo de pequeños bagres neotrópicales, se han reportado ocurrencia de leucismo en *Astroblepus ubidiai* procedente de una población aisladas de la cuenca del río Mira y en *Astroblepus pholeter* que habitan la caverna de Latas, Cuenca del río Napo [15, 16]. El objetivo del presente estudio es reportar casos de leucismo en *Astroblepus fissidens* y *Astroblepus brachycephalus*. Los ejemplares leucísticos provienen de metapoblaciones, que habitan cuerpos de agua en la región Andina y Litoral de Ecuador (Fig. 1).

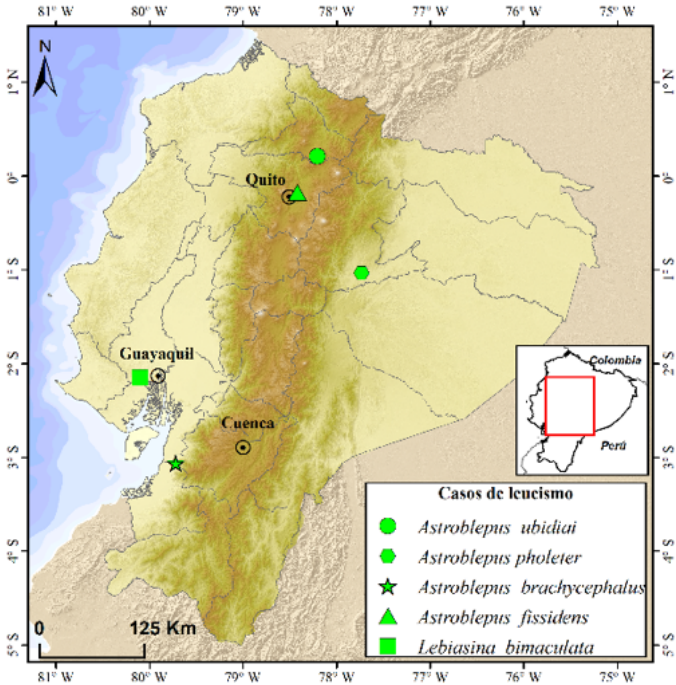


FIGURA 1. Distribución espacial de los casos de leucismo en peces dulceacuícolas en Ecuador.



Un macho adulto de *A. fissidens* de 70,23mm de longitud estándar con leucismo fue fotografiado (cámara SONY DSC-W830) en la vertiente Amabulo, afluente del río San Pedro, parroquia Nayón, cantón Quito, provincia de Pichincha, cuenca alta del río Esmeraldas, (-0.175447S -78.418791W, 2100m), el 28 de febrero 2012. Un macho juvenil de *A. brachycephalus* de 40,75 mm de longitud estándar con leucismo fue colectado en el río Villa, cantón Ponce Enríquez, provincia de Azuay, cuenca del río Siete (-3.063201S -79.719691W, 359m), el 24 de abril 2012. No se colectó el ejemplar leucístico de *A. fissidens* y su evidencia se está registrada en archivos fotográficos. El espécimen de *A. brachycephalus* se encuentran depositados en el Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales, Instituto Nacional de Biodiversidad (MECN-DP3528).

Los individuos de *A. fissidens* y *A. brachycephalus* generalmente presentan un variado patrón de coloración, típicamente presentan dorsos de color marrón, pardo oscuro o gris, con manchas pequeñas de diversas tonalidades de negro, marrón y blanco. Las aletas pueden presentar los mismos colores y patrones mencionados para el dorso o pueden ser amarillas (Figs. 2A, C). Los ejemplares leucísticos presentaron despigmentación en todo el cuerpo, excepto en el pedúnculo, parte superior de la cabeza y en los radios duros de la aleta dorsal y caudal, donde observamos pequeñas manchas oscuras; en ambos casos la coloración de la piel es rosada-rojiza (Figs. 2B, D).



2A



2B



2C



FIGURA 2. Patrón de coloración típicos y leucísticos: **A** Ejemplar de *Astroblepus fissidens* con coloración normal (98 mm); **B** Ejemplar de *Astroblepus fissidens* leucístico (70,23mm); **C** Ejemplar de *Astroblepus brachycephalus* con coloración normal (94,34mm); **D** Ejemplar de *Astroblepus brachycephalus* leucístico (40,75mm). Fotografías: F. Anaguano-Yancha.

A pesar de la enorme diversidad de especies de peces presentes en Sudamérica, los reportes de aberraciones pigmentarias en la ictiofauna son muy escasos. Actualmente existen 20 casos reportados en 18 especies. Ocho casos se han reportado en Brasil, cuatro en Argentina, tres en Ecuador, un caso en Uruguay y tres casos no proporcionar referencias sobre la localidad, el 70% de estos casos corresponden albinismo y 30% a leucismo [Tabla 1]. En Ecuador son recientes los reportes de leucismo en vertebrados, atribuidos principalmente a la alta probabilidad de endogamia a causa del aislamiento poblacional [15, 30]. Además, recientemente se ha corroborado la reducción de pigmentación en astroblepídeos que habitan galerías subterráneas [16].

A nivel global, los ecosistemas de agua dulce son los más amenazados, principalmente, por el crecimiento de la población humana y el desarrollo económico [31, 32]. Las condiciones físicas y químicas del agua son frecuentemente modificadas por el incremento de sedimentos en el agua, la remoción del sustrato, la reducción del volumen de agua, la construcción de presas y las descargas de vertimientos residuales sin tratamiento previo, provenientes de la industria y de las cloacas de ciudades y poblados [33, 34]. Estas afectaciones modifican la estructura y conexión de los sistemas acuáticos dentro de la red hídrica ocasionando el aislamiento poblacional, interrumpiendo el flujo génico [34]. Sumado a esto, la contaminación por metales pesados causa efectos importantes en las condiciones de salud de los peces, así como también afecciones genéticas [12, 35].

Varios estudios han expuesto que las altas frecuencias de aberraciones pigmentarias en poblaciones de fauna silvestre podrían ser indicativos de aislamiento poblacional, contaminación, exposición a metales pesados o estrés ambiental [11-13, 27]. Durante varias décadas, los ríos San Pedro y Siete han sido contaminados por descargas industriales y domésticas de las ciudades y poblados aledaños. Análisis de sus aguas y sedimentos indican que hay un grado de perturbación antropogénico muy severo [36, 37], lo que ha provocado que las poblaciones de *A. fissidens* y *A. brachycephalus* queden aisladas en pequeños esteros sin conexión hacia la cuenca principal, reduciéndose el flujo genético, cual lo reportado para ecosistemas acuáticos en los Andes Tropicales que presentan un alto grado de contaminación [34]. Probablemente el aislamiento poblacional, aumente la ocurrencia de endogamia propiciando la manifestación de aberraciones cromáticas. Sin embargo, no se puede aseverar que esta sea la causa, razón por la cual, es necesario realizar estudios futuros sobre la variabilidad genética de estas especies en las cuencas antes mencionada para probar esta hipótesis.



Otra posible explicación de la manifestación de aberraciones cromáticas en *A. brachycephalus* podría estar relacionada con desordenes genéticos causados por la exposición a metales pesados, como los evidenciados en arroyos que sufren contaminación de sus sustratos por Cadmio (Cd) y Cromo (Cr) en Brasil [12]. La extracción de oro constituye una fuente importante de contaminación por metales pesados de los ríos que drenan las áreas mineras del cantón Camilo Ponce Enríquez, donde se ha reportado altas concentraciones de metales pesados en sus sedimentos, especialmente de Cd [37], que supera los estándares de calidad de los sedimentos establecidos por el Ministerio del Ambiente de Canadá para la protección de la fauna acuática [38]. A pesar de esto, no se puede aseverar que esta sea la causa, ya que se ha reportado altos contenidos de metales pesados en peces bentónicos [37], así como también en aves [39], sin embargo, no encontraron casos de aberraciones pigmentarias, razón por la cual, es indispensable realizar una investigación más exhaustiva de estos aspectos en las concesiones mineras del Ecuador, para determinar si la exposición a metales pesados propicia la manifestación de aberraciones cromáticas en la fauna silvestre.



3A



3B



FIGURA 3. Hábitats de los registros de leucismo: **A** Vertiente Amabulo; **B** Río San Pedro, nótese el alto grado de contaminación; **C** Río Villa ; **D** Actividad minera en el río Villa. Fotografías: J. Juiña (A), F. Anaguano-Yancha (C, B), T. Meza (D).



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Consultora socio ambiental AmbienConsul, que contrató mis servicios para la realización de evaluaciones faunísticas en varios puntos del proyecto minero Gaby-Papagrande (provincia de Azuay), en el marco del desarrollo de los estudios socioambientales que se realizaron en la zona. A. Naveda, J. Brito, D. Racines y dos revisores anónimos revisaron el manuscrito, realizando valiosos aportes. La Dirección Provincial del Ambiente del Azuay otorgó la autorización de investigación N° 019-AZ-2011.

TABLA 1. Aberraciones cromáticas reportadas para Sudamérica en peces de agua dulce.

Orden	Familia	Especie	Aberración cromática	País	Referencia
Characiformes	Erythrinidae	<i>Hoplias malabaricus</i>	Albinismo	Brasil	[18]
	Lebiasinidae	<i>Lebiasina bimaculata</i>	Leucismo	Ecuador	[17]
Gymnotiforme	Gymnotidae	<i>Gymnotus carapo</i>	Albinismo	Brasil	[19]
		<i>Gymnotus carapo</i>	Albinismo	Brasil	[20]
Siluriformes	Doradidae	<i>Oxydoras knerii</i>	Albinismo	Argentina	[21]
	Heptapteridae	<i>Imparfinis mirini</i>	Albinismo	Brasil	[22]
	Pimelodidae	<i>Zungaro zungaro</i>	Albinismo	Argentina	[23]
		<i>Rhandella minuta</i>	Albinismo	Brasil	[24]
		<i>Pseudopimelodus</i> sp.	Albinismo	---	[25]
		<i>Phractocephalus hemiliopterus</i>	Albinismo	---	[25]
		<i>Corydoras paleatus</i>	Albinismo	Brasil	[26]
	Callichthyidae	<i>Megalechis thoracata</i>	Albinismo	Argentina	[21]
		<i>Corydoras aeneus</i>	Albinismo	Brasil	[25]
		Loricaridae	<i>Rhinelepis aspera</i>	Albinismo	Uruguay
	<i>Rhinelepis aspera</i>		Leucismo	Brasil	[14]
	<i>Hypostomus plecostomus</i>		Albinismo	---	[25]
	<i>Schizolecis guntheri</i>		Albinismo	Brasil	[28]
Astroblepidae	<i>Astroblepus ubidiai</i>	Leucismo	Ecuador	[15]	
	<i>Astroblepus pholeter</i>	Leucismo	Ecuador	[16]	
	<i>Astroblepus brachycephalus</i>	Leucismo	Ecuador	Este estudio	
	<i>Astroblepus fissidens</i>	Leucismo	Ecuador	Este estudio	
Ceratodontiformes	Lepidosirenidae	<i>Lepidosiren paradoxa</i>	Albinismo	Argentina	[29]



REFERENCIAS

- [1] Fujii, R. (2000). The regulation of motile activity in fish chromatophores. *Pigment Cell Research*, 13(5), 300–319. doi: <http://www.dx.doi.org/10.1034/j.1600-0749.2000.130502.x>
- [2] Dawson, C. (1964). A Bibliography of Anomalies of Fishes. *Gulf Research Reports*, 1 (6), 308–399. doi: <http://www.dx.doi.org/10.18785/grr.0106.01>
- [3] Dawson, C. (1966). A Bibliography of Anomalies of Fishes, Supplement 1. *Gulf Research Reports*, 2 (2), 169–176. doi: <http://www.dx.doi.org/10.18785/grr.0202.03>
- [4] Dawson, C. (1971). A Bibliography of Anomalies of Fishes, Supplement 2. *Gulf Research Reports*, 3 (2): 215–239. doi: <http://www.dx.doi.org/10.18785/grr.0302.05>
- [5] Dawson, C. and Heal, E. (1976). A Bibliography of Anomalies of Fishes: Supplement 3. *Gulf Research Reports*, 5 (2), 35–41. doi: <http://www.dx.doi.org/10.18785/grr.0502.05>
- [6] Shin, M. K. (2000). Controlling Gene Expression in Mice with Tetracycline: Application in Pigment Cell Research. *Pigment Cell Research*, 13, 326–331. doi: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0749.2000.130504.x>
- [7] Sugimoto, M. (2002). Morphological Color Changes in Fish: Regulation of Pigment Cell Density and Morphology. *Microscopy Research and Technique*, 58, 496–503. doi: <https://doi/pdf/10.1002/jemt.10168>
- [8] Clark, S. (2002). First Report of Albinism in the White-Spotted Bamboo Shark, *Chiloscyllium plagiosum* (Orectolobiformes: Hemiscylliidae), With a Review of Reported Color Aberrations in Elasmobranchs. *Zoo Biology*, 21, 519–524. doi: <https://doi.org/10.1002/zoo.10068>
- [9] Evangelista-Leal, M., Horst-Schulz, U., Lehmann-Albornoz, P., Machado, R., and Ott, P. H. (2013). First record of partial albinism in two catfish species of *Genidens* (Siluriformes: Ariidae) in an estuary of Southern Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 56(2), 237–240. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-89132013000200008>
- [10] Bigman, J. S., Knuckey, J. D. S. and Ebert, D. (2015). Color aberrations in Chondrichthyan fishes: first records in the genus *Bathyraja* (Chondrichthyes: Rajiformes: Arhynchobatidae). *Marine Biodiversity*, 46(3), 579–587. doi: <https://doi.org/10.1007/s12526-015-0403-z>
- [11] Bensch, S., Hansson, B., Hasselquist, D., and Nielsen, B. (2000). Partial albinism in a semi-isolated population of great reed warblers. *Hereditas*, 133, 167–170. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.2000.t01-1-00167.x>
- [12] Baggio, H., and Horn, A. H. (2010). Teores totais e distribuição dos metais pesados Cu, Cd, Cr, Ni Pb e Zn nos sedimentos de corrente e fundo do rio do Formoso – MG. *Geografias*, 6, 107–117. Recuperado de <http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geografias/article/view/504/375>
- [13] Quigley, D. T. G., Lord, R., MacGabhann, D., and Flannery, K. (2017). First records of xanthochromism in three-bearded rockling *Gaidropsarus vulgaris* (Cloquet, 1824) and pollack *Pollachius pollachius* (Linnaeus, 1758). *Journal Applied of Ichthyology*, 33(6), 1208–1210. doi: <https://doi.org/10.1111/jai.13456>
- [14] Nobile, A. B., Freitas-Souza, D., de Lima, F. P., Acosta, A., and Da Silva, R. J. (2016). Partial albinism in *Rhinelepis aspera* from the Upper Paraná Basin, Brazil, with a review of albinism in South American freshwater fishes. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87 (2), 531–534. doi: <http://www.dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2016.04.005>
- [15] Mena-Valenzuela, P., and Valdiviezo-Rivera, J. (2016). Leucismo en *Astroblepus ubidiai* (Pellegrin 1931) (Siluriformes: Astroblepidae), de la provincia de Imbabura, Ecuador. *Biota Colombiana*, 17 (1), 131–136. doi: <http://dx.doi.org/10.21068/C2016v17r01a10>
- [16] Espinasa, L., Robinson, J., Soares, D., Hoese, G., Toulkeridis, T. and Toomey, T. (2018). Troglomorphic features of *Astroblepus pholeter*, a cavefish from Ecuador, and possible introgressive hybridization. *Subterranean Biology*, 27, 17–29. doi: <https://doi.org/10.3897/subtbiol.27.27098>
- [17] Nugra, F., Anaguano-Yancha, F., Arizaga, C., Zárate, E., and Brito, J. (2018). Leucism in the fish *Lebiasina bimaculata* (Characiformes: Lebiasinidae) in Guayas, Ecuador. *Biota colombiana*, 19(2), 133–139. doi: <http://dx.doi.org/10.21068/c2018.v19n02a12>
- [18] Silva, T., Araújo, T. and Bicudo, A. (2013). First report of albinism in trahira *Hoplias malabaricus* from Brazil. *Boletim do Instituto de Pesca de São Paulo*, 39, 457–460. Recuperado de https://www.pesca.agricultura.sp.gov.br/39_4_457-460.pdf
- [19] Campos-da Paz, R. and Caramaschi, E. P. (1994). First record of albinism in a gymnotiform fish (Teleostei: Ostariophysii). *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, 5, 1–4.
- [20] Oliveira, C. and Foresti, F. (1996). Albinism in the banded knifefish, *Gymnotus carapo*. *Tropical Fish Hobbyist*, 44, 92–96.

- [21] Del Barco, D. M., and Panattieri, A. E. (1980). Un caso de albinismo en armado chanco *Oxidoras kneri* Bleeker 1862. Pisces, Doradidae. Comuni-caciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino. *Zoología gila*, 9, 9-10.
- [22] Manoel, P., Ono, E. and Alves, I. (2017). First report of albinism in the South American catfish *Imparfinis mirini* (Siluriformes: Heptapteridae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 471–473. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.030>
- [23] Taberner, R., Fernández-Santos, J. O., and Castelli, J. O. (1976). Un manguruyú albino *Paulicea luetkeni* (Steindachner 1876) Eigenmann 1910. *Physis* B, 35(91), 121-123.
- [24] Sazima, I. y Pombal, J. P. (1986). Um albino de *Rhamdellaminuta*, com notas sobre comportamento (Osteichthyes, Pimelodidae). *Revista Brasileira de Biologia*, 46, 377–381. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/277776337_Um_albino_de_Rhamdella_minuta_com_notas_sobre_comportamento_Osteichthyes_Pimelodidae
- [25] Burgess, W. E. (1989). *An atlas of freshwater and marine catfishes: a preliminary survey of the Siluriformes*. New Jersey, United States of America: TFH Publications.
- [26] Fach, D. (1963). Albinotische *Corydoras paleatus*. *Aquarien Terrarien Zeitschriften*, 16, 225-227.
- [27] Luengo, J. A. (1965). Un caso de albinismo en *Rhinelepis aspera* Agassiz del Uruguay (Pisces, Loricariidae). *Neotropica*, 11, 51–52.
- [28] Brito, M. F. G. and Caramaschi, E. P. (2005). An albino armored catfish *Schizolecis guntheri* (Siluriformes: Loricariidae) from an Atlantic Forest coastal basin. *Neotropical Ichthyology*, 3, 123–125. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/ni/v3n1/v3n1a09.pdf>
- [29] Azpelicueta, M. M. and Braga, L. (1984). Albinismo en *Lepidosiren paradoxa* Fitzinger, 1837 (Osteichthyes, Dipnoi, Lepidosirenidae). *Neotropica*, 30, 75–78.
- [30] Brito, J., and Valdivieso-Bermeo, K. (2016). First records of leucism in eight species of small mammals (Mammalia: Rodentia). *Therya*, 7, 483-489. doi: <http://www.dx.doi.org/10.12933/therya-16408>
- [31] Russi, D., Brink, P., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Förster, J., Kumar, R., and Davidson, N. (2013). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands*. London and Brussels Institute for European Environmental Policy, Gland, Switzerland: Ramsar Secretariat. Recuperado de: <https://www.cbd.int/financial/values/g-ecowaterwetlands-teeb.pdf>
- [32] Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., and Davies, P.M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555–561. doi: <http://www.dx.doi.org/10.1038/nature09440> 10.1038/nature09440
- [33] Dudgeon, D. (2012). Threats to freshwater biodiversity globally and in the Indo-Burma Biodiversity Hotspot. En D. J. Allen, K. G. Smith, & W. R. T. Darwall (Eds.), *The Status and Distribution of Freshwater Biodiversity in Indo-Burma*, 1-25. Cambridge and Gland, Switzerland: IUCN. Recuperado de: https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/indo_burma_report_complete_low_res_28_aug_1.pdf
- [34] Tognelli, M.F., Lasso, C.A., Bota-Sierra, C.A., Jimenez-Segura, L.F. and Cox, N.A. (Eds.). (2016). Estado de Conservación y Distribución de la Biodiversidad de Agua Dulce en los Andes Tropicales. Gland, Cambridge and Arlington: IUCN. doi: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.02.es>
- [35] Palacio, J.A. (2007). *Ecotoxicología acuática*. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
- [36] Campaña, A., Gualoto, E., and Chiluisa-Utreras, V. (2017). Evaluación físico-química y microbiológica de la calidad del agua de los ríos Machángara y Monjas de la red hídrica del distrito metropolitano de Quito. *Bionatura*, 2(2), 305–310. doi: <http://www.dx.doi.org/10.21931/RB/2017.02.02.6>
- [37] Tarras-Wahlberg, N. H., Flachier, A., Fredriksson, G., Lane, S., Lundberg, B., and Sangfors, O. (2000). Environmental Impact of Small-scale and Artisanal Gold Mining in Southern Ecuador: Implications for the Setting of Environmental Standards and for the Management of Small-scale Mining Operations. *Ambio*, 29(8), 484–491. doi: <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.8.484>
- [38] Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001). Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Updated. En *Canadian Environmental Quality Guidelines*, 1999. Winnipeg, Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment. Recuperado de: https://www.elaw.org/system/files/sediment_summary_table.pdf
- [39] Albuja, L., Montalvo, L., Cáceres, F., and Jácome, N. (2011). Niveles de mercurio en aves silvestres de tres regiones mineras del sur del Ecuador. *Revista Politécnica*, 30(3), 18–32. Recuperado de [http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5239/1/Mercurio-Aves-Ecuador%202012Politecnica30\(3\).pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5239/1/Mercurio-Aves-Ecuador%202012Politecnica30(3).pdf)

Registro del Piquero Pardo *Sula leucogaster* (Aves: Suliformes: Sulidae) en el Refugio de Vida Silvestre Isla Santa Clara, Ecuador

Teddy Ochoa¹, César Garzón^{2*}

¹ Ministerio de Ambiente, Dirección del Ambiente de la provincia de El Oro, Av. Vela entre 25 de Junio y Av. Sucre, Machala, Ecuador.

² Instituto Nacional de Biodiversidad, División de Ornitología, pasaje Rumipamba 341 y Av. de los Shyris, Casilla Postal 17-07-8976. Quito, Ecuador.

*Autor para correspondencia/Corresponding author, e-mail: cesar.garzon@biodiversidad.gob.ec

Registration of the Brown Booby *Sula leucogaster* (Birds: Suliformes: Sulidae) in the Santa Clara Island Wildlife Refuge, Ecuador

Resumen

Reportamos un nuevo registro de distribución de Piquero Pardo *Sula leucogaster* (Sulidae) en el Refugio de Vida Silvestre de la Isla de Santa Clara, en el Golfo de Guayaquil, 43km de Puerto Bolívar, Machala, provincia de El Oro. Fue observado en un período de 10 días entre el 7 al 17 de julio de 2016, cerca del centro de interpretación ambiental de la isla. Se observó una hembra cerca de un grupo de Piqueros Patas Azules (*Sula neboxii*), que la desplazaron a otra zona de isla. No existen reportes previos publicados de esta especie en la parte suroccidental del Ecuador.

Palabras clave: Ave marina, especie pantropical, isla, distribución

Abstract

We report a new distribution record of the Brown Booby *Sula leucogaster* (Sulidae) in the Island of Santa Clara Wildlife Refuge, Gulf of Guayaquil, 43km from Puerto Bolivar, Machala, province of El Oro. It was observed over a 10-days period between 7 to July 17, 2016, near the environmental interpretation center. A female was first observed near a group of Blue-Footed Boobies (*Sula neboxii*), but it was later displaced to a different part of the island. There are no previous published report for this species in Ecuador.

Keywords: Seabird, pantropical species, island, distribution

El Piquero Pardo *Sula leucogaster* (Boddaert, 1783) es un ave marina común en aguas tropicales de todo el mundo. Su distribución se describe como pantropical y se extiende en el océano Pacífico desde las costas norte desde la península de California llegando hasta el sur en las costas de Panamá y Colombia [1–2]. También se distribuye en el océano Atlántico, Índico, en el mar Caribe, mar Rojo y en los mares al norte de Australia

[1]. Esta especie presenta una gran capacidad de dispersión y se le ha registrado más allá de su rango de distribución, con individuos reportados en diferentes estados de la costa oeste de los Estados Unidos [3–5], en Columbia Británica [6] y en Alaska [7]. Los registros más al sur han sido reportados a 19,3km de las costas de Perú en la Isla Huampanú [8] y en los islotes al suroccidente de la Isla de Pascua [9].

Esta especie pelágica es considerada como un visitante muy raro en aguas abiertas a lo largo de la costa norte de Ecuador [10]. Los registros en Ecuador de esta especie incluyen individuos observados en junio 2000 en la Isla de la Plata, provincia de Manabí [11]; en diciembre 2008, a 57,4km al norte de Punta Galeras, provincia de Esmeraldas [12]; y en junio 2010, cerca de la Chocolatera, en la provincia de Santa Elena [13]. Según McMullan y Navarrete [14] es una especie muy rara en las costas del noroccidente de la provincia de Esmeraldas. En la presente contribución presentamos un nuevo registro de esta especie en Ecuador.

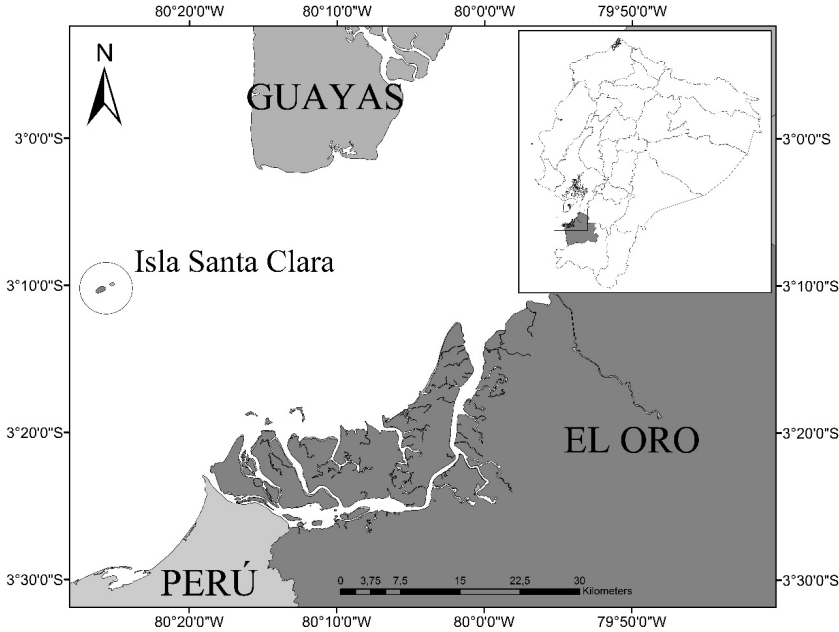


FIGURA 1. Ubicación de la Isla San Clara, provincia de El Oro, Ecuador

El 7 julio del 2016 a las 18:15, observamos un Piquero Pardo en la Isla Santa Clara, a 47 km de la costa ecuatoriana, en la provincia de El Oro (Fig. 1), en la parte baja cerca del campamento de guardaparques (-3.173460 , -80.636058). Este reporte constituye el primer registro documentado de la presencia de esta especie en la Isla de Santa Clara y además la observación más al sur de Ecuador a 125km de la Chocolatera en la provincia de Santa Elena. El piquero observado (Fig. 2) presentaba las características de una hembra adulta debido a su plumaje marrón oscuro en la cabeza, cuello, alas y



espalda, mientras que su vientre es de color blanco, pico y patas verde amarillento, ala ventral blanco [2]. El macho difiere de la hembra por presentar la cabeza y cuello de gris a marrón, más pálido que la espalda, alas y cola [2]. Según estas características y el rango distribución de esta especie se puede tratar de la subespecie *S. l. etesiaca* [15], cuya distribución es la zona muy húmeda del Pacífico oriental, donde el límite más extremo sur es el cabo San Francisco al norte de Ecuador y el norte no está bien conocido, pero se extiende seguramente hasta las costas de México [2]. *Sula leucogaster leucogaster* difiere de *S. l. etesiaca* por tener la cabeza y el cuello claramente más oscuros que la espalda, las alas y la cola [16]. La subespecie *S. l. brewslei* tiende a tener la cabeza de color gris claro a blanco que poco a poco se vuelve marrón en el cuello y la parte superior de la espalda más oscura que otras especies de *S. leucogaster* [17]. *Sula leucogaster plotus* tienen las partes superiores, el cuello y la garganta de color castaño oscuro claramente cortadas en la parte superior del pecho, el resto de las partes inferiores de color blanco, y el castaño oscuro se junta al marrón del borde delantero del ala [16].



FIGURA 2. Características del Piquero Pardo *S. leucogaster* Teddy Ochoa P., 2016

La primera vez que observamos el Piquero Pardo estaba perchedo en medio de una colonia de Piqueros Patas Azules *Sula nebouxii* (Fig. 3). Permaneció durante una hora en ese lugar, después el grupo de piqueros se comportó de forma hostil contra el Piquero Pardo, siguiéndole y picoteándole hasta desplazarle a la parte alta de la estructura donde se está construyendo el centro de interpretación (Fig. 4). Este comportamiento agresivo es normal entre individuos de la misma especie de Piquero Patiazul y se relacionado con su territorialidad en el limitado espacio de la isla.

Luego de la primera observación, esta especie fue monitoreada todos los días, desde el 7 de julio hasta su último registró el 17 de julio. El Piquero Pardo permaneció en la Isla Santa Clara durante 10 días, siempre en el mismo sitio aproximadamente las 06h00 hasta 07h45 y desde las 17h45 hasta el anochecer. Las horas en que no era registrado

en la isla posiblemente el Piquero Pardo se encontraba alimentándose en el mar o cerca de los barcos pesqueros, regresando a la isla al atardecer para descansar. Después de la última observación se efectuaron recorridos alrededor de la isla para confirmar su ausencia o presencia. Durante el tiempo de permanencia del Piquero Pardo en la isla no se observó comportamiento agresivo con otras especies.



FIGURA 3. Observación del Piquero Pardo *S. leucogaster* en medio de Piquero Patiazul *S. neboxii*.
Teddy Ochoa P., 2016



FIGURA 4. *Sula leucogaster* desplazado a la parte alta de la estructura en donde se está construyendo el centro de interpretación ambiental de la Isla Santa Clara. Teddy Ochoa P., 2016



Durante los registros realizados Isla Huampanú (Perú) y en las islas de La Plata y Santa Clara (Ecuador), *S. leucogaster* se observó cerca de individuos de Piquero Peruano *S. variegata*, de Piquero de Nazca *S. grantii* y *S. neboxii*. Por esta razón, en futuras observaciones se recomienda poner mucha atención a las colonias de piqueros, debido a que puede registrar nuevamente al Piquero Pardo, especialmente en las islas alejadas de la costa ecuatoriana.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a los dos técnicos del área protegida: Blgo. José Luis Mena y al Per. For. Edwin Sánchez por revisar y comentar esta nota científica.

REFERENCIAS

- [1] Schreiber, E. A. and R. L. Norton (2002). *Brown Booby (Sula leucogaster)*, version 2.0. Birds of North America A. F. Poole and F. B. Gill. (Eds). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. doi: <https://doi.org/10.2173/bna.649>
- [2] Murphy, R. C. (1936). *Oceanic birds of South America: a study of species of the related coasts and seas, including the American quadrant of Antarctica, based upon the Brewster-Sanford collection in the American Museum of Natural History*. The American Museum of Natural History, New York, United States of America: MacMillan Company.
- [3] Ceyca, J. P., y Mellink, E. (2009). Ecología reproductiva del bobo café (*Sula leucogaster*) en Morros el Potosí, Guerrero, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 80(3), 793-800.
- [4] Oregonbirds.org. (2012). *Oregon Field Ornithologists. OFO*. Recuperado de <http://www.oregonbirds.org/index.html>.
- [5] Wahl, T. R., Tweit, B., and Mlodinow, S. (2005). *Birds of Washington*. Oregon, United States of America: Oregon State University Press.
- [6] Morgan, K., Wallace, S., y Krause, G. (2009). First record of a Brown Booby in British Columbia, Canada. *British Columbia Birds*, 19, 13-15.
- [7] Gibson, D., DeCicco, L., Gill Jr. R., Heintz, S., Lang, A., Tobish Jr, G., Withrow, J. (2015). Checklist of Alaska Birds: 21st Edition: 2015. *University of Alaskan museum*. Recuperado de <http://www.universityofalaskamuseumbirds.org/products/checklist.pdf>.
- [8] Valverde, M. (2007). Registro del Piquero Pardo *Sula leucogaster* en una isla del Perú. *Biologist* (Lima). Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/BVRevistas/biologist/v05_n2/pdf/a05v05n2.pdf
- [9] Flores, M., Lazo, P., and Hucke-Gaete, R. (2013). Estado del conocimiento de los piqueros pantropicales (Sulidae) en las islas oceánicas chilenas y primer registro de piquero café *Sula leucogaster* en Isla de Pascua. *Revista de biología marina y oceanografía*, 48(3), 667-672. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572013000300025>
- [10] Ridgely, R. S., Greenfield, P. J., Coopmans, P., and Kalil, G. (2006). *Aves del Ecuador: Guía de campo*. Quito, Ecuador: Fundación Jocotoco.
- [11] Cisneros-Heredia, D. F. (2005). La avifauna de la isla de La Plata, Parque Nacional Machalilla, Ecuador, con notas sobre nuevos registros. *Cotinga*, 24, 22-27. Recuperado de <http://www.neotropicalbirdclub.org/wp-content/uploads/2016/12/C24-Francisco.pdf>
- [12] Agreda A., Torres, S., Hasse, B., y Samaniego, J. (2011). Investigaciones de la avifauna marina en aguas continentales ecuatorianas con énfasis en su distribución, diversidad, abundancia y estado de conservación. *Acta Oceanográfica del Pacífico*. 16 (1).
- [13] Haase, B. J. M. (2011). *Aves marinas de Ecuador continental y acuáticas de las piscinas artificiales de Ecuasal*. Guayaquil, Ecuador: Aves & Conservación, BirdLife International and Ecuasal SA.
- [14] McMullan, M., y Navarrete, L. (2013). *Fieldbook of the Birds of Ecuador: including the Galápagos Islands*. Quito, Ecuador: Fundación de Conservación Jocotoco.
- [15] Nelson, B. (1978). *The Sulidae: Gannets and Boobies* (No. 154). Oxford, England: Oxford University Press.
- [16] Redman, N., Stevenson, T., and Fanshawe, J. (2011). *Birds of the Horn of Africa: Ethiopia, Eritrea, Djibouti, Somalia, and Socotra*. London, England: Imprint of Boomsbury Publishing Plc.
- [17] Langteau, J. (2017). *Sula leucogaster* (brown booby). *Animal Diversity Web*. Recuperado de https://animaldiversity.org/accounts/Sula_leucogaster/

Evaluación de las proporciones de almidón de yuca y emulsificantes para el mejoramiento textural de una torta libre de gluten

Mariana Vélez*, Laura C. Jimenez, Ximena Yépes

Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias, Ingeniería de Alimentos, Medellín, Colombia

*Autor para correspondencia/Corresponding author, e-mail: mariana.velez9@gmail.com

Evaluation of proportions of cassava starch and emulsifiers for textural improvement of gluten free cake

Abstract

Celiac disease is an autoimmune enteropathy precipitated by exposure to gluten in foods such as wheat, barley and rye in individuals who are genetically predisposed. In the last ten years the production of gluten-free foods at the global level has increased almost 28%, including traditional products in which it seeks to ensure that these comply with physical and sensory characteristics inherent in the product. The objective of this work was to perform a design of experiments in response surface to evaluate the different proportions of starch from cassava and emulsifiers in the elaboration of a gluten free cake and thus improve textural attributes. Eleven were developed cakes varying only the percentage of starch from cassava and emulsifiers as obtained in the design of experiments; to each one of them were determined the pore size and height in triplicate, and specific gravity by means of the AACC 10-90. The response variables obtained were optimized in the Software Design Expert 8.0 giving as a result a Severity Specifies minimized of 0.8014%, maximized height of 65.711 mm and a range of pore size of between 1.9-2.5 mm, it was subsequently determined the optimal point with the amount of emulsifier and cassava starch suitable for the elaboration of a gluten free product with the desired textural features (emulsifier 1.5% and starch from cassava 19.65%). Emulsifiers and cassava starch in appropriate proportions allow for physical and sensory characteristics similar to those which gives the wheat flour and can be consumed by people who suffer from celiac disease as an alternative supplement to your daily diet.

Keywords: Cake, gluten-free flours, emulsifiers, cassava starch.

Resumen

La enfermedad celíaca es una enteropatía autoinmune precipitada por la exposición al gluten en alimentos como el trigo, la cebada y el centeno en individuos genéticamente predispuestos. En los últimos 10 años la producción de alimentos libres de gluten a nivel mundial ha aumentado casi un 28%, incluyendo productos tradicionales en

los que se busca que estos cumplan con características físicas y sensoriales propias del producto. El objetivo de este trabajo fue realizar un diseño de experimentos de superficie de respuesta para evaluar las diferentes proporciones de almidón de yuca y emulsificantes en la elaboración de una torta libre de gluten y así mejorar atributos texturales. Se elaboraron once tortas variando únicamente el porcentaje de almidón de yuca y emulsificantes según lo obtenido en el diseño de experimentos; a cada una de ellas se les determinó el tamaño del poro y altura por triplicado, y gravedad específica por medio de la AACC 10-90. Las variables respuesta obtenidas fueron optimizadas en el software Desing Expert 8.0 dando como resultado una gravedad específica minimizada de 0.8014%, la altura maximizada de 65.711 mm y un rango de tamaño de poro entre 1.9-2.5 mm, posteriormente se determinó el punto óptimo con la cantidad de emulsificante y almidón de yuca adecuados para la elaboración de un producto libre de gluten con las características texturales deseadas (emulsificante 1,5% y almidón de yuca 19,65%). Los emulsificantes y el almidón de yuca en proporciones adecuadas permiten obtener características físicas y sensoriales similares a las que otorga la harina de trigo y puede ser consumido por personas que padecen de celiaquía como un suplemento alternativo a su dieta diaria.

Palabras clave: Torta, Harinas libres de gluten, Emulsificantes, Almidón de yuca

INTRODUCCIÓN

La enfermedad celíaca (EC) es una enteropatía crónica autoinmune precipitada, en individuos genéticamente predispuestos, por la ingestión de gluten. El gluten es un conjunto de proteínas de almacenamiento presentes en diferentes cereales, incluyendo el trigo, el centeno, la cebada y la avena (las aveninas de la avena son consideradas como un tipo de gluten, pero su nivel de inmunoreacción va a depender del cultivar consumido; además, la presencia de gluten en avena puede aparecer por contaminación cruzada) [1–3]. La EC conlleva un aumento del riesgo de varias enfermedades malignas, incluyendo los cánceres y los tumores malignos hematológicos del tracto gastrointestinal [4]. El único tratamiento efectivo para la EC es adherirse a una dieta libre de gluten. En 2013, la Administración de Medicamentos y Alimentos de los Estados Unidos (FDA) emitió una regla final para la definición de “libre de gluten” en el etiquetado de alimentos [5]. Sin embargo, actualmente las tendencias del mercado no favorecen a las personas intolerantes al gluten. A pesar de que en los últimos 10 años la producción de alimentos libres de gluten ha aumentado casi un 28% a nivel mundial, la ingesta de alimentos es limitada debido a la poca variedad de productos que ofrece el mercado y su alto costo [6]. Casi la mitad de los pacientes que tienen EC consideran que llevar una dieta libre de gluten implica un costo mucho más alto que el costo de una dieta regular [7]. Por lo tanto, es importante explorar nuevas opciones que ayuden a extender la dieta diaria pensando en las personas que padecen EC y buscando ampliar el portafolio de alternativas para la población en general. Esto incluye el desarrollo de productos tradicionales que no pongan en riesgo la salud, que cumplan con características fisicoquímicas y sensoriales aceptables y propias del producto tradicional con gluten, y que sean de bajo costo.



Desde la ingeniería de alimentos es posible subsanar el vacío a nivel de alimentos libres de gluten en Colombia. La opción a futuro es encontrar opciones libres de gluten, para así ampliar la variedad nutricional de las personas que sufren EC y poder fomentar estilos de vida saludables.

El uso del gluten se masificó debido a su capacidad de retener aire en la matriz proteica facilitando que la masa se adhiriera mejor, fenómeno que favorece la elaboración de pan. La producción de alimentos horneados sin adición de harina de trigo representa un importante reto tecnológico, debido a la ausencia de gluten que genera las propiedades visco-elásticas. Para compensar, algunos hidrocoloides se incorporan a menudo en formulaciones libres de gluten [8]. Estos hidrocoloides actúan como agentes emulsionantes y como agentes de estabilización emulsionante y su función principal es unir moléculas de agua y aceite de forma homogénea, logrando un balance hidrolipofílico. Es así, que estos emulsificantes son acondicionadores de masa y ablandadores de la miga [8]. Los emulsificantes mejoran las propiedades físicas de los productos, proporcionando mayor volumen por la captación de aire durante el amasado. También, se observa migas más flexibles, con alveolados más finos y uniformes, y como consecuencia de una mayor tolerancia se reducen los problemas derivados de la fatiga de la masa en su transformación por las máquinas. Los mono- y diglicéridos de los ácidos grasos son muy utilizados como emulsionantes en la elaboración de batidos de pastelería [9]. Los emulsionantes tienen la posibilidad de sustituir parcialmente la grasa, el azúcar o ambos en una formulación pastelera. El uso de emulsionantes provee mayor expansión global, mejor distribución de los alvéolos de la miga y homogeneidad de éstos y se puede mejorar el perfil de textura durante el almacenamiento del producto [10].

El almidón es el carbohidrato de mayor abundancia en la naturaleza. Su influencia es importante ya que cuanto mayor es su contenido, el producto resulta más adhesivo, característica que se aprovecha extensamente como agente espesante, estabilizante y adhesivo en la industria alimentaria [11]. El almidón de yuca posee características para mejorar la textura, impartir viscosidad, ligar agua, proveer cohesión y mantener la tolerancia a los procesos, necesaria y requerida para la manufactura. Estos almidones tienen la propiedad de prolongar la vida útil de los alimentos garantizando a su vez calidad [12].

La finalidad de esta investigación fue la elaboración de una torta de naranja libre de gluten con base en una formulación estándar con harina de maíz y harina de arroz, para sustituir la harina de trigo, y la adición de almidón de yuca y emulsificantes en diferentes concentraciones para encontrar el punto óptimo textural adecuado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las mezclas de tortas compuestas por harina de trigo, huevos, grasa y azúcar, exhiben comportamiento viscoelástico, combinando las propiedades de un fluido y un sólido. Cada ingrediente es esencial en la mezcla, exhibiendo un rol importante en la definición estructural, reológica y textural de las propiedades de la torta. Cualquier cambio realizado en los ingredientes básicos o proporciones de los mismos conlleva a un cambio en las propiedades físicas, químicas y sensoriales del producto final [13]. El proceso de

elaboración de una torta implica modificaciones estructurales dependiendo de la formulación y las condiciones del proceso, las cuales son fenómenos de importancia para la calidad de la torta y pueden ser investigadas por medio de análisis reológicos y estructurales, usando técnicas como la medición de la viscosidad y análisis de imágenes correlacionando las concentraciones de gluten con los cambios generados en las propiedades de la mezcla de la torta durante el horneado y con el producto final [14]. Las propiedades texturales de un producto juegan un papel muy importante en la apreciación de los alimentos; ya que surge de la interacción al momento de consumirse. Esta percepción constituye un criterio para controlar la calidad y es un factor fundamental de selección o rechazo. Al mezclar batidos, por ejemplo, es importante medir la cantidad de aire incorporado a la mezcla, lo cual se determina mediante la medición de la gravedad específica [15]. Un rango intermedio para este parámetro (0.5 a 0.6) es usado para tortas esponjosas como el bizcochuelo, mientras que un rango alto (0.9 a 0.95) es común para tortas pesadas como los 'layer cakes' [16].

Materia Prima

Se utilizó harina de arroz y harina de maíz suministrada por la empresa C.I. Atussa Ltda (Itagüí, Antioquia, Colombia); con las siguientes características: humedad, 10–13,5%; grasa, 0,5–1,5%; fibra, 0,1%; cenizas, 0,2–0,4%; proteína, 5,8%; carbohidratos totales, 80,7%; calorías, 352,3 Kcal/100g; índice de gelatinización, 21,72. Las dos harinas estuvieron libres de gluten. Para la preparación de la torta se usó una proporción de harinas de 1:1. La goma Xantan fue obtenida por medio de la empresa Bell Chem Internacional S.A., con un tamaño de partícula de 76.2 μ . La inulina fue suministrada por el Laboratorio de Lácteos de la Universidad de Antioquia, siendo el proveedor directo Tecnas S.A., con un grado de pureza de $\geq 92\%$. El almidón de yuca fue provisto por la empresa Colorisa S.A. Los estabilizantes usados fueron monoestearato de glicerilo y polisorbato 60, suministrados por la empresa Bell Chem Internacional S.A. Los siguientes ingredientes, utilizados en la evaluación de las tortas, fueron adquiridos en un mercado local de la ciudad de Antioquia (marca comercial o variedad entre paréntesis): harina de trigo (Haz de Oros), huevos (Avinal), azúcar (Manuelita), polvo de hornear (Condimentos El Rey), sal (Refisal), margarina (La Fina), y naranjas (Navelate).

Preparación de la Torta

La formulación inicial de la torta fue obtenida por medio de porcentajes panaderos, es decir, la cantidad total de harinas de la mezcla (harinas de arroz y de maíz) se tomó como el 100% y a partir de ahí se calcularon los porcentajes adecuados para cada uno de los ingredientes. El proceso de batido y formulación de la torta fueron estandarizados bajo condiciones, tiempos, temperaturas y equipos constantes con el fin de tener la menor variabilidad en las mediciones. El batido se realizó con ayuda de una batidora de mano Black&Decker® Spatula Smart® de 3 velocidades. Inicialmente se realizó una mezcla y homogeneización completa del azúcar con la mantequilla en velocidad 3 durante 3.31 minutos (3000rpm), luego se añadió los ingredientes sólidos (previamente mezclados) y líquidos alternadamente para lograr una total homogeneización de la mezcla. Este proceso se realizó durante 7.22 minutos en velocidad 3 para generar la máxima incorporación de aire en el batido. Se utilizó moldes circulares estándar en los



cuales se horneó individualmente 400g de mezcla para cada formulación. El horneado se llevó a cabo en un horno de convección Salva KWIK-CO que logra mantener una temperatura uniforme en su interior, gracias a sus ventiladores internos. Se manejó un tiempo estándar de 32 minutos de horneado a 140°C para cada torta. Este tipo de horno ahorra un 20% de tiempo de preparación a temperaturas más bajas, a diferencia de los hornos convencionales. Cada formulación fue desarrollada independientemente, es decir, cada formulación tuvo un proceso independiente desde la preparación de la premezcla hasta el horneado para evitar desviaciones en el diseño estadístico. Las tortas fueron retiradas del horno y desmoldadas 10 minutos después, posteriormente se reservaron para mediciones.

Medición de la gravedad específica de la masa

Con el fin de conocer la cantidad de aire incorporado a la mezcla, se realizó la medición de la gravedad específica cuyo resultado adimensional numéricamente coincide con la densidad. Para la medición se tomó un recipiente de 8,7cm de diámetro y 4cm de alto, se lo pesó completamente lleno de agua y posteriormente se vertió dentro el batido, evitando la presencia de burbujas grandes y emparejando el recipiente con una espátula. La medición de la gravedad específica se hizo una sola vez y se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación (1):

$$GE = \frac{\text{Peso del Batido(g)}}{\text{Peso del agua (g)}} \quad (1)$$

Medición del tamaño de poro y altura de la torta

La medición de las variables tamaño de poro y altura de la torta fueron realizadas utilizando el software Image J, un programa de procesamiento digital de imágenes que permite tomar una escala de referencia y medir distancias sobre una imagen determinada con apreciación subjetiva de las imágenes. Se tomó tres fotografías a cada tipo de torta directamente sobre su vista transversal. En total se obtuvo 33 imágenes durante los experimentos que fueron analizadas realizando mediciones por triplicado de las variables del tamaño del poro y altura, utilizando siempre el mismo operador para mantener constantes los errores sistemáticos. La medición de tamaño de poro se realizó escogiendo un poro de la torta de cada fotografía, después de tener la escala establecida en centímetros se traza una línea horizontal en medio del poro y el software arroja la medida exacta de este trazo que corresponde al diámetro del poro. Para la medición de altura, después de tener la escala establecida en centímetros, se toma un punto en la parte inferior y central de la torta en cada fotografía y allí se traza una línea hasta la corteza de la torta, el software arroja la medida de esta línea que corresponde a la altura de la torta. Estas medidas se reportan con 3 cifras significativas.

Diseño Experimental

Se realizó una optimización del proceso de elaboración de la torta libre de gluten mediante un diseño de superficie de respuesta *IV Optimal*, en función de dos factores en la formulación: porcentaje del emulsificante (0–2%) y porcentaje del almidón de yuca

(0–50%), generando 11 unidades experimentales utilizando el software Desing Expert 8.0. Las variables dependientes a optimizar fueron: gravedad específica, tamaño de poro y altura de la torta (Tabla 1). El análisis estadístico se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA), donde las diferencias significativas y las correlaciones se llevaron a cabo en los datos experimentales adoptando el método de diferencia mínima significativa con un nivel de significancia menor o igual a un 5%. El análisis de regresión para los modelos de cada variable respuesta en función de los factores de diseño fue de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (2)$$

Donde Y es la variable respuesta, X_1 y X_2 son los factores, β_0 es el intercepto, β_1 , β_2 y β_{12} son los efectos asociados a cada factor y su interacción respectivamente

TABLA 1. Diseño experimental IV Optimal de superficie de respuesta para tortas libres de gluten con emulsificantes y almidón de yuca en diferentes concentraciones.

Aleatorización	Corrida	Emulsificante (%)	Almidón Yuca (%)
9	1	0,00	50,00
1	2	0,00	0,00
6	3	1,79	25,00
2	4	2,00	0,00
11	5	2,00	50,00
8	6	0,00	50,00
7	7	1,00	42,50
3	8	2,00	0,00
10	9	2,00	50,00
5	10	0,21	25,00
4	11	1,00	7,50

Finalmente, con los resultados obtenidos del punto óptimo se realizó una comparación múltiple por medio del Test de Fisher entre las medias de cada uno de los factores respecto al modelo calculado.

RESULTADOS

Se elaboró once tortas bajo las mismas condiciones de temperatura y tiempo controladas. La gravedad específica varió entre 0,801 y 1,068, el tamaño de poro entre 1,801 y 2,798mm y la altura de la torta entre 25.246 y 65.712mm (Tabla 2), dependiendo de cada corrida.

TABLA 2. Gravedad específica, tamaño de poro y altura de tortas libres de gluten con emulsificantes y almidón de yuca en diferentes concentraciones.

Corrida	Gravedad específica	Tamaño de poro (mm)	Altura torta (mm)
1	0,947	2,413	25,246
2	1,068	1,801	35,125
3	0,801	2,463	61,522
4	0,845	2,527	65,712
5	0,890	2,768	29,049
6	0,940	2,548	27,415
7	0,891	2,798	40,589
8	0,825	2,557	63,830
9	0,880	2,684	32,795
10	0,880	2,235	52,911
11	0,960	2,165	45,842

La cantidad de emulsificantes, la adición de almidón de yuca y su interacción influyeron significativamente en el tamaño de poro entre cada una de las corridas (Tabla 3, Fig. 1). La medida de la gravedad específica establece la cantidad de aire que se ha incorporado a la mezcla durante el batido en relación a la densidad del agua. Valores mayores a 1,0 son característicos de batidos pesados y que durante el horneado no tendrán la capacidad de crecer, por el contrario, valores por debajo indican que la mezcla es más liviana que el agua y ha incorporado una cantidad de aire que le permitirá desarrollar mejores características sensoriales en el producto final. Como se esperaba la adición de emulsificantes tuvo una gran significancia en la gravedad específica del batido, el porcentaje de almidón por sí solo también fue significativo en la medición de esta variable, pero en menor cantidad. Sin embargo, la interacción entre ambos factores es muy relevante para la medición de la gravedad específica (Tabla 4, Fig. 2). Se obtienen poros de diámetro horizontal muy grande al utilizar 50% de almidón de yuca y entre 1.0% y 1.5% de emulsificantes y poros muy pequeños con 0% de ambos (Fig. 1). Si se desea obtener una torta esponjosa y un batido con una gravedad específica menor a 1.0, se deben utilizar emulsificantes entre 1.5% y 2.0% y almidón de yuca entre 10% y 20% (Fig. 1).

La altura de la torta después del horneado fue una variable principalmente afectada por la cantidad de emulsificantes que contenía la formulación. Los huevos aportaron en gran parte a la emulsión y homogeneización de la mezcla; sin embargo, otros agentes emulsificantes proporcionaron mucha suavidad y esponjosidad al producto final (Tabla 3). La adición de emulsificantes, almidón de yuca y su interacción, fueron factores significativos en la altura de torta. El aumento de almidón de yuca afectó negativamente la altura de la torta ya que esta no creció durante el horneado y sus características sensoriales finales no fueron agradables debido a que presentó dificultad al partir la tajada y la miga fue muy compacta para este tipo de producto. Se observa una relación de almidón de yuca entre 10% y 20% y emulsificantes entre 1.0% y 2.0% para tortas con alturas superiores a 55mm (Fig. 1).

TABLA 3. Análisis de varianza ANOVA para el tamaño de poro, la gravedad específica y la altura en relación al porcentaje de almidón de yuca y emulsificantes en tortas libres de gluten.

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Valor p
TAMAÑO DE PORO					
Modelo	0.78	5	0.16	10.73	0.0105
A-Emulsificantes (%)	0.43	1	0.43	29.18	0.0029
B-Almidón de yuca (%)	0.44	1	0.44	30.41	0.0027
AB	0.1	1	0.1	7.14	0.0442
A ²	0.02	1	0.02	1.37	0.2941
B ²	0.008216	1	0.008216	0.56	0.4864
Total	0.85	10			
GRAVEDAD ESPECÍFICA					
Modelo	0.053	5	0.11	31.8	0.0009
A-Emulsificantes (%)	0.037	1	0.037	111.57	0.0001
B-Almidón de yuca (%)	0.00363	1	0.00363	10.86	0.0216
AB	0.012	1	0.012	37.07	0.0017
A ²	0.00231	1	0.00231	6.91	0.0466
B ²	0.013	1	0.013	37.88	0.0016
Total	0.055	10			
ALTURA					
Modelo	2256.26	5	451.25	35.79	0.0006
A-Emulsificantes (%)	517.54	1	517.54	41.05	0.0014
B-Almidón de yuca (%)	718.18	1	718.18	56.96	0.0006
AB	260.44	1	260.44	20.66	0.0061
A ²	40.17	1	40.17	3.19	0.1343
B ²	431.69	1	431.69	34.24	0.0021
Total	2319.3	10			

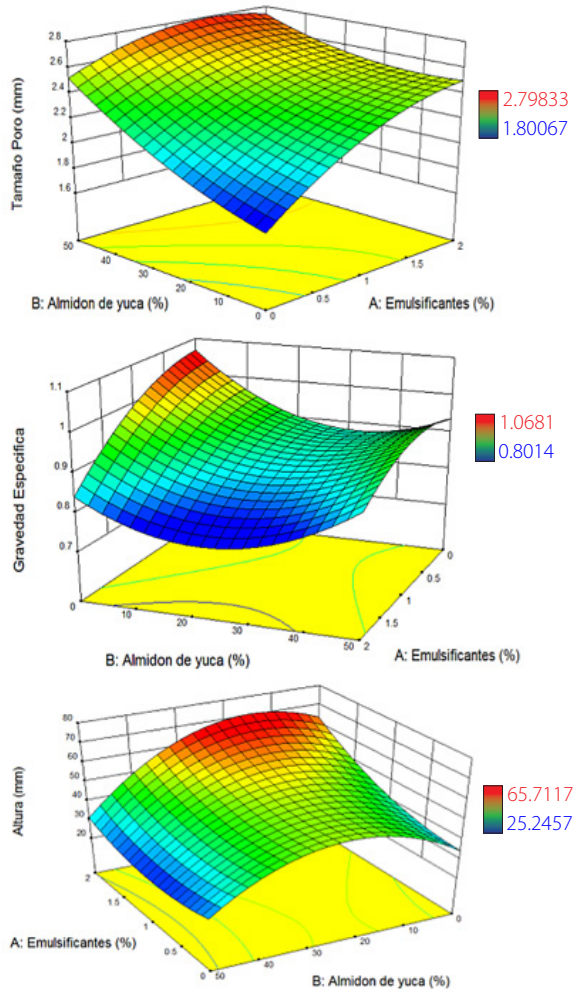


FIGURA 1. Superficie de respuesta para el tamaño de poro, gravedad específica y altura de la torta en relación al porcentaje de almidón de yuca y emulsificantes en tortas libres de gluten.

Los modelos que explican cada una de las variables evaluadas y su variación de acuerdo a la cantidad de emulsificantes y almidón de yuca usada son:

$$\text{Altura} = 53.22 + 8.21A - 9.84B - 6.34AB \quad (3)$$

$$\text{Gravedad específica} = 0.87 - 0.070A - 0.022B + 0.044AB \quad (4)$$

$$\text{Tamaño de poro} = 2.44 + 0.24A + 0.24B - 0.13AB \quad (5)$$

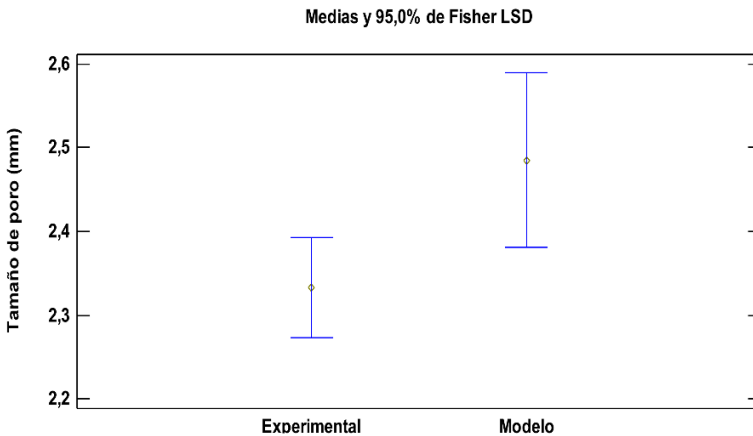
Donde A: %Emulsificantes y B: %Almidón de yuca.

Las variables respuesta fueron optimizadas así: Emulsificantes (0%-1,5%), Almidón de yuca (0%-20%), gravedad específica minimizando (0.8014), tamaño de poro (1,9–2,5mm), altura maximizando (65,711mm). A partir de estos parámetros establecidos, el programa arrojó tres soluciones y se utilizó los siguientes parámetros del punto óptimo para realizar nuevamente la torta: Emulsificantes 1,5%, almidón de yuca 19,64%, gravedad específica 0,829, tamaño de poro 2,485mm, y altura 60,774mm. Se realizaron las mismas mediciones de los once experimentos iniciales (Tabla 4).

TABLA 4. Tamaño de poro, altura de la torta y gravedad específica; realizadas a una torta libre de gluten con los parámetros del punto óptimo.

Replicas	Tamaño del poro (mm)			Altura de la torta (mm)			Gravedad específica		
1	2,25	2,25	2,26	60,08	60,07	60,08	0,893	0,891	0,891
2	2,48	2,48	2,49	59,98	60,01	59,79	0,887	0,89	0,889
3	2,26	2,26	2,27	60,01	60,04	60,04	0,891	0,895	0,892

Con el fin de comparar los datos teóricos con los experimentales, y comprobar si los modelos de cálculo obtenidos para cada variable las explican en un gran porcentaje, se realizó una comparación entre el modelo teórico y experimental (Fig. 2). Hubo una coincidencia clara entre las medias del valor experimental y el modelo teórico para el tamaño de poro y la altura de la torta. Sin embargo, no se vio una evidente relación entre los valores de la gravedad específica, aunque, se pudo observar que la variación es muy pequeña y tomó valores entre 0.82 y 0.90, lo cual no refleja una diferencia significativa en los resultados.



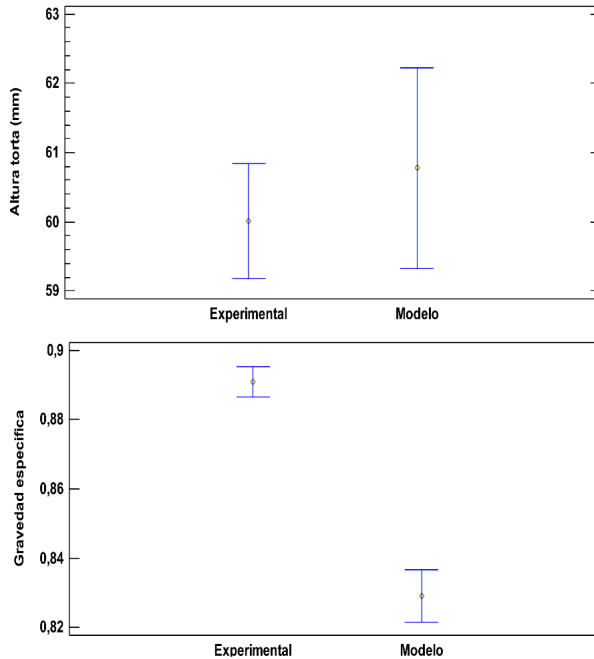


FIGURA 2. Comparación de medias en el Test de Fisher del modelo experimental y teórico para tamaño de poro, altura de la torta y gravedad específica.

DISCUSIÓN

El arroz y el maíz están entre los cereales considerados aptos para ser consumidos por la población celíaca y ha sido estudiados como sustituto del trigo en la formulación de productos panificados [17]. Sin embargo, los productos elaborados con arroz o maíz como sustitutos del trigo raramente cuentan con buena aceptabilidad, ya que no tienen la propiedad de formar una fase continua y una buena estructura de masa cuando son mezcladas con el agua. Por esta razón, se incorporan emulsificantes a la formulación, ingredientes capaces de aportar propiedades viscoelásticas, aspecto de fundamental importancia para la formación y el establecimiento de la estructura que determina la textura final de los productos elaborados con harina de trigo [18].

Los almidones nativos de diferentes especies de vegetales tienen como característica fundamental que sus propiedades fisicoquímicas y funcionales estarán influenciadas por sus estructuras granulares y moleculares. Las propiedades más importantes a considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas: gelatinización y retrogradación; y las funcionales: solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles [19, 20]. Estudios sugieren que el uso del almidón de yuca, con la adición de margarina y clara de huevo, reducen la magnitud de gelatinización y solubilización del almidón en productos panificables, aumentando la cantidad de aire atrapado durante el batido de la masa en la fase de mezclado [21].

En este estudio se determinó las proporciones óptimas para la elaboración de una torta libre de gluten que cumpla unas características de textura específicas, usando como mejoradores almidón de yuca y estabilizantes. Se evidenció que altas cantidades de almidón de yuca producen características indeseadas en el producto como apelmazamiento, tamaño de poro más altos y sensaciones granuladas a nivel sensorial. La adición de la mezcla de emulsificantes influyó positivamente durante su evaluación y en todas las cantidades analizadas; ya que son moléculas con un extremo afín a los líquidos y hacen posible la formación de una emulsión estable, homogénea y fluida. Propiedades como tamaño de poro, altura obtenida y gravedad específica son parámetros de gran funcionalidad al evaluar las características texturales de un producto panificable; ya que permiten controlar e identificar las irregularidades dentro del alimento; así como determinar sensaciones y cualidades sensoriales. Es necesario, sin embargo, tener en cuenta que dentro de la elaboración del producto se encuentran factores importantes que inciden directamente en la elaboración de la torta como son el orden de adición de los ingredientes, el tiempo de batido, el tipo de horno, la temperatura y el tiempo de horneado.

El diseño experimental demostró diferencias significativas al adicionar las diferentes cantidades de emulsificantes a la torta, ya que los mono- y diglicéridos de los ácidos grasos favorecen la incorporación de aire en la masa durante el batido, mejorando el volumen y la textura. Estos factores se vieron reflejados en las cantidades necesarias de mejoradores para obtener una torta con propiedades de textura óptimas y similares a las aportadas por la harina de trigo, usando sustitutos libres de gluten (harina de arroz y de maíz). De igual modo se observaron en las diferentes aplicaciones de los mejoradores para el batido, que las características texturales se afectaron directamente, encontrando así diferencias entre los tamaños de poro, altura de la torta y propiedades sensoriales que variaba según la proporción seleccionada.

La aceptación de los consumidores por aspectos visuales, de sabor y textura juega un papel importante en la producción panadera [22]. La textura es un indicador importante de frescura y calidad para el consumidor, siendo un factor clave para la aceptación del producto en el mercado [23]. Los productos elaborados con otro tipo de harinas a menudo poseen menor volumen y migas y cortezas más grandes [24]. La inclusión de almidón de yuca y emulsificantes en proporciones adecuadas afecta positivamente las características sensoriales de los productos obtenidos [24].

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la asesora Luz Mery Echeverri, Profesor Esteban Largo y Óscar Vega, al Ingeniero David Velásquez y a los monitores del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Mariana Vélez Gutierrez, Laura Cristina Jimenez y Ximena Yepes Sánchez trabajaron en la concepción del estudio, desarrollo de los experimentos, análisis de los datos y redacción del manuscrito.

REFERENCIAS

- [1] Biesiekierski, J. R. (2017). What is gluten? *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 32(S1), 78–81. doi: <https://doi.org/10.1111/jgh.13703>
- [2] de Souza, M. C. P., Deschênes, M. E., Laurencelle, S., Godet, P., Roy, C. C., and Djilali-Saiah, I. (2016). Pure oats as part of the Canadian gluten-free diet in celiac disease: The need to revisit the issue. *Canadian Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2016(1576360), 1–8. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1576360>
- [3] Comino, I., Moreno, M. L., and Sousa, C. (2015). Role of oats in celiac disease. *World Journal of Gastroenterology*, 21(41), 11825–11831. doi: <https://dx.doi.org/10.3748%2Fwjg.v21.i41.11825>
- [4] Lebwahl, B., Eriksson, H., Hansson, J., Green, P. H. R., and Ludvigsson, J. F. (2014). Risk of cutaneous malignant melanoma in patients with celiac disease: A population-based study. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 71(2), 245–248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2014.03.029>
- [5] FDA (2016) Gluten-Free Labeling of Foods. *U.S. Food and Drug Administration*. Recuperado de <https://www.fda.gov/media/88857/download>
- [6] Singh, J., and Whelan, K. (2011). Limited availability and higher cost of gluten free foods. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 24(5), 479–486. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-277X.2011.01160.x>
- [7] Whitaker, J. K. H., West, J., Holmes, G. K. T., and Logan, R. F. A. (2009). Patient perceptions of the burden of coeliac disease and its treatment in the UK. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics*, 29(10), 1131–1136. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2036.2009.03983.x>
- [8] Hager, A. S., and Arendt, E. K. (2013). Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids*, 32(1), 195–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.12.021>
- [9] Ranjith, H. P., and Wijewardene, U. (2006). Lipid emulsifiers and surfactants in dairy and bakery products. In Gustone, F.D. (Eds.) *Modifying lipids for use in food* (pp. 393–428). Boston: United States of America: Woodhead Publishing.
- [10] Ranjith, H. P., and Wijewardene, U. (2006). Lipid emulsifiers and surfactants in dairy and bakery products. In *Modifying lipids for use in food* (pp. 393–428). Woodhead Publishing. doi: <https://doi.org/10.1533/9781845691684.3.393>
- [11] García, J. R. (2014). *Reformulación de productos homeados para disminuir el contenido en grasa y azúcar mediante sustitución con inulina. Efectos sobre la estructura y propiedades físicas* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València). Universidad de Valencia, España.
- [12] Morales Moreno, M. M. (2013). *Evaluación de la adición de emulsificantes y componentes fisiológicamente activos en la elaboración de buñuelo* (Doctoral dissertation). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- [13] Saeleaw, M., and Schleining, G. (2010). Effect of blending cassava starch, rice, waxy rice and wheat flour on physico-chemical properties of flour mixtures and mechanical and sound emission properties of cassava crackers. *Journal of food engineering*, 100(1), 12–24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.020>
- [14] Conforti, F.D. (2007). Cake Manufacture. In Y.H. Hui (Ed.), *Bakery Products: Science and Technology* (pp. 393–410). Amez, IA: Blackwell Publishing.
- [15] Hesso, N., Garnier, C., Loisel, C., Chevallier, S., Bouchet, B., & Le-Bail, A. (2015). Formulation effect study on batter and cake microstructure: Correlation with rheology and texture. *Food Structure*, 5, 31–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2015.03.002>
- [16] Rosenthal, A.J. (2001) *Textura de los alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acribia.
- [17] O'Donnell, K. (2016) *Manual de Producción de Panadería*. Xlibris.
- [18] Gujral, H. S., and Rosell, C. M. (2004). Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Research International*, 37(1), 75–81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2003.08.001>

- [19] Clerici Pedrosa, S., y El-Dash, M.T. (2006) Harina extrusada de arroz como sustituto de gluten en producción de pan. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 56.
- [20] Wang, L. Z., and White, P.J. (1994). Structure and properties of amylose, amylopectin, and intermediate materials of oat starches. *Cereal Chemistry*, 71(3), 263-268.
- [21] Hernández-Medina, Marilyn, Torruco-Uco, Juan Gabriel, Chel-Guerrero, Luis, & Betancur-Ancona, David. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology (Campinas)*, 28(3), 718-726. <https://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612008000300031>
- [22] Eggleston, G. (1992). Can we make a marketable cassava bread without wheat?. *Cassava Newsletter (CIAT)*, 16(1), 7–8.
- [23] Siro, I., Kápolna, E., Kápolna, B., & Lugasi, A. (2008). Functional food. Product development, marketing and consumer acceptance—A review. *Appetite*, 51(3), 456-467. doi: <https://doi.org/10.1016/j.appet.2008.05.060>
- [24] Brady, P. L., & Mayer, S. M. (1985). Correlation of sensory and instrumental measures of bread texture. *Cereal Chemistry*, 62(1), 70-72.
- [25] Heiniö, R. L. (2006). Sensory attributes of bakery products. *Bakery products: science and technology*, 285-298.

Perceptions on construction-related factors that affect concrete quality, costs and production

Jorge Santamaria^{1,3*}, Vanessa Valentin²

¹ Department of Civil Engineering, University of New Mexico, MSC01 1070, Albuquerque, NM 87131

² Department of Civil Engineering, University of New Mexico, MSC01 1070, Albuquerque, NM 87131

³ Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

Autor para correspondencia/Corresponding author, e-mail: jluis@unm.edu

Percepciones de los factores relacionados a la construcción que afectan la calidad del hormigón, costos y producción

Resumen

El hormigón es afectado por los llamados factores estructurados y no estructurados. Los primeros están relacionados a la producción del hormigón mientras que los factores no estructurados están relacionados con el proceso constructivo. Este estudio se enfoca en examinar la importancia percibida de los factores no estructurados en el esfuerzo de compresión del hormigón, sus costos y producción en la obra; así como también, en comprender la influencia de la tipología de los expertos en construcción, como la profesión, en sus percepciones. Una amplia revisión de la literatura fue llevada a cabo para identificar los factores no estructurados. Una encuesta fue diseñada y enviada a 297 expertos de la industria de la construcción y academia para examinar la importancia de los factores identificados en la literatura a través del método del índice de importancia relativa (RII) e identificar factores no estructurados adicionales. Agrupación Likert y pruebas de igualdad de chances fueron utilizadas para comparar y analizar las respuestas de dos grupos de participantes: arquitectos e ingenieros. Humedad de curado, experiencia de la cuadrilla y el método de compactación son los tres factores más importantes percibidos que afectan el esfuerzo de compresión del hormigón, mientras que la experiencia de la cuadrilla, el tiempo de mezclado y el método de compactación son los factores percibidos que más afectan los costos y tasas de producción del hormigón. La experiencia de la cuadrilla, el método de compactación y el tiempo de mezclado dominan el ranking global de los factores percibidos que afectan al esfuerzo de compresión, los costos y tasas de producción del hormigón. Se encontró que los arquitectos son los más propensos a percibir altos o muy altos impactos de estos factores en el hormigón. El presente estudio incrementa nuestro entendimiento de los factores no estructurados para facilitar el manejo de un proyecto y preservar las características del hormigón.

Palabras clave: Calidad, costos, esfuerzo de compresión, hormigón, factores que afectan, producción

Abstract

Structured and unstructured factors affect concrete product. Structured factors are related to concrete production and unstructured factors are related to the construction process.

This study focuses on examining the perceived importance of unstructured factors (i.e., construction-related factors) on concrete compressive strength, concrete costs and production rates on the jobsite and understanding the influence of construction experts' characteristics, such as profession, on their perceptions. A comprehensive literature review was performed to identify unstructured factors. A survey was then designed and deployed to 297 experts from the construction industry and academia to examine the importance of the identified factors through the relative importance index (RII) method and to further identify additional unstructured factors. Likert aggregation and tests for equality of odds were used to compare and analyze responses of two groups of participants, namely architects and engineers. Curing humidity, crew experience and compaction method are the top three factors perceived to affect concrete compressive strength, whereas crew experience, mixing time and compaction method are the factors perceived to affect concrete costs and production rates the most. Crew experience, compaction method and mixing time dominate the global ranking of perceived affecting factors for concrete compressive strength, costs and production rates. Architects were found to be more likely to perceive high or very high impacts of these factors on concrete. The present study increases our understanding of construction-related factors to facilitate project management and preserve concrete characteristics.

Keywords: Affecting factors, compressive strength, concrete, costs, production, quality

INTRODUCTION

Concrete is a construction material made of water, Portland cement, aggregates and admixtures, which are mixed together in specific proportions to meet construction specifications for such qualities as compressive, tensile or flexural strength. In addition to steel, concrete is one of the two most popular construction materials currently used in the construction industry, and it is the second most utilized product in the world after water [1,2]. Moreover, concrete demand increases every day, due to its properties and increases in population around the world. In fact, in the United States, around 260 million cubic yards of concrete are used each year by the construction industry [3].

Concrete compressive strength is commonly used to measure concrete quality, and it is an important parameter for designers and for concrete quality control [4,5]. Compressive strength is used for measuring concrete quality because concrete is mainly employed to withstand compression forces. Therefore, compressive strength is the quality metric used for judging concrete quality in this study.

Concrete quality should be ensured from its production to its final placement into the forms, finishing and curing on any construction site. Ready-mixed concrete undergoes stringent quality controls during its production and transportation. However, there are several uncertain factors or conditions that are not considered after concrete trucks arrive at a construction site that can change the characteristics of the final concrete product [1]. In addition, when concrete is fabricated in situ, additional factors may affect



concrete quality and can cause possible significant changes in its mechanical properties. Several prior studies have investigated the impact that factors related to the production of concrete – including raw material properties or mixture designs – have on concrete quality, such as the influence of water-cement ratio, entrained air, aggregate size and age on compressive strength and the effects of admixtures on concrete compressive strength [1, 4-7]. With respect to costs and production rates, studies of affecting factors are scarce. O'Connor [8] pointed out that factors affecting crew production rates are difficult to measure and quantify due to intrinsic variables. Also, the author emphasized that the lack of existing actual data for specific activities containing particular details prevents researchers from accurately investigating construction time effects. Jarkas [9, 10] investigated the influence of buildability on labor productivity by employing experienced crews and argued other factors such as the level of crew skills and experience may influence concrete productivity and costs. Heravi and Eslamdoost [11] studied labor productivity factors in the construction industry in order to lower costs and project duration. However, the literature is limited regarding factors present when fabricating concrete and their impact on compressive strength as a quality metric, as well as on costs and production rates.

Yuan et al. [12] classified factors affecting concrete strength into two categories: structured and unstructured. Structured factors are factors related to the production of concrete, such as raw materials quantities and quality and mix designs [12]. As previously mentioned, these factors have already been studied deeply and, in fact, several correlations have already been proposed including the influence of water-cement ratio on compressive strength for non-air-entrained concretes [4]. Unstructured factors are those associated with the construction process of a facility such as workforce skills and local conditions on the construction site; there is no clear understanding of their consequences on concrete strength [12]. Fig. 1 summarizes the factors that affect the concrete production and construction processes.

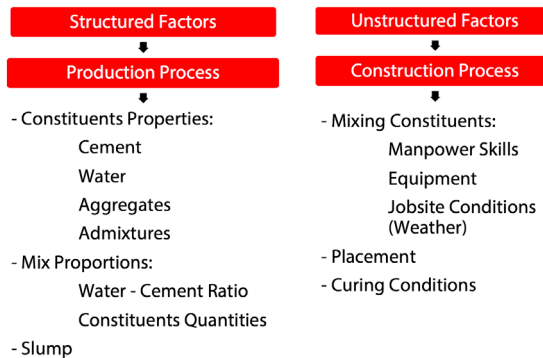


FIGURE 1. Factors that affect concrete during its production and construction processes

Understanding the impact of construction specialists' attributes on their perceptions about factors affecting concrete performance is crucial so that appropriate actions can be taken to improve construction processes and management. Even though perception

studies are not common in engineering, several studies have analyzed how subjects' characteristics influence their perceptions on engineering and construction issues [13]. Dai et al. [14] studied the perceptions of construction workers regarding factors affecting their productivity by deploying a survey containing Likert-type questions. Lu and Yan [15] pointed out that knowledge of construction groups or individuals is limited regarding risk perception. Zhang et al. [16] suggested that understanding the risk perceptions of different groups such as architects and engineers allows adequate construction management, implying that the attributes of different groups of professionals influence their perceptions. Rodríguez-Garzón et al. [13], also using a questionnaire, studied the risk perception of construction workers in the context of uncertainty and occupational risk in the construction industry. Tymvios and Gambatese [17] claimed that comparing the responses of different groups allows one to identify the group that is more likely to support a perception. All studies imply that perceptions depend on the characteristics of an individual or a group of people sharing the same background, meaning that different groups (e.g., architects and engineers) have different perceptions due to intrinsic characteristics of each group. Thus, it is important to evaluate the impact of construction experts' characteristics on their perceptions about construction-related factors to facilitate project management and preserve concrete properties.

The main goal of this study is to increase our understanding about how unstructured factors affect concrete quality, costs and production rates. The objectives are: (1) identify and evaluate the perceived importance of construction-related factors that affect concrete compressive strength as a quality metric, as well as costs and production rates, and (2) measure how construction experts' characteristics influence their perceptions of these factors. These objectives will be accomplished by performing a comprehensive literature review, deploying a survey to construction experts and using RII and odds ratios to estimate their perceived importance. The results will inform project managers, superintendents and technicians, to prevent concrete quality from being influenced by affecting factors on the jobsite. In addition, current practices and mitigation actions are discussed for future research.

METHODOLOGY

The proposed methodology investigates unstructured factors affecting concrete quality during the construction process, since these factors can cause important concrete quality variability and should be taken into consideration on the job site [12]. To identify such unstructured factors, the research methodology shown in Fig. 2 was used.

The first step consisted of performing a review of relevant literature, to identify unstructured factors that affect concrete quality. Next, a survey was designed and deployed to construction experts (i.e., individuals with experience in the construction industry, such as contractors, architects, engineers and academics). This survey included questions about unstructured factors identified in the literature and asked for others that had been identified or recognized by the survey respondents throughout their careers. RII was then utilized to identify and evaluate the perceived importance of factors that highly affect concrete quality, costs and production rates. The quality metric for concrete was also determined from the literature and survey responses. Next, construction



experts' characteristics, such as profession or experience, were analyzed through the use of Likert aggregation and 2x2 contingency tables (i.e., chi-square tests for equality of odds), to determine their influence on experts' responses. The techniques chosen for analysis responded to the study objectives and the properties of the survey data [18].

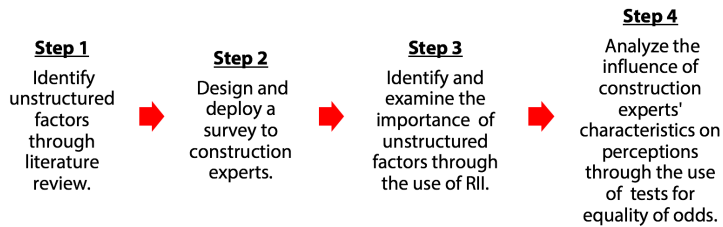


FIGURE 2. Research methodology

Identification of Unstructured Factors

Construction codes including the ACI building code play an important role when building with concrete. They attempt to preserve concrete final product by giving general guidelines that need to be taken into account during concrete fabrication; however, the aforementioned codes do not give specific recommendations regarding construction site conditions (i.e., unstructured factors) that may be present at the jobsite. Laungrungrong et al. [19] argued that the increasing use of concrete creates the necessity of having methods or techniques to control its quality and that failing to identify strength problems may cause project delays and cost overruns. The variability in concrete compressive strength may be caused not only by mixing incorrect quantities of its components or utilizing poor quality materials but also by concrete transportation, placement and compaction, implying that compressive strength not only depends on its production process but also on uncertain conditions on the construction site [20]. Thus construction site conditions should be not only identified but also require special attention.

A comprehensive literature review was carried out tending to identify unstructured factors affecting concrete compressive strength, costs and production rates. Such process revealed several studies highlighting, mainly, factors affecting compressive strength as a quality metric. Neville and Brooks [1] pointed out that water-cement ratio, degree of compaction, age and ambient temperature (i.e., hot- and cold-weather concreting) should be taken into consideration in practice, in order to avoid compression strength reduction, implying that those factors should be monitored constantly. However, the study stated that there are other factors such as mixing time, curing temperature and humidity that should also be considered when making concrete. In addition, Li [21] mentioned water-cement ratio, cement content, aggregates, admixtures, mixing procedures and curing conditions as factors that influence concrete properties, recognizing influencing factors inherent to construction processes.

Moreover, Kosmatka et al. [4] argued that special attention should be paid to mixing time, placement, consolidation (i.e., by hand or mechanically), rain protection (to avoid

adding extra water to the concrete), finishing operations (e.g., flattening surfaces), curing and protection from extreme temperature changes (i.e., curing temperature and humidity) and hot and cold weather concreting (i.e., ambient temperature) in order to maintain concrete quality. Mehta and Monteiro [5] argued that factors modifying concrete compressive strength include the proportions and materials of the concrete mixture and degree of consolidation and conditions of curing. The authors emphasized that concrete curing involves temperature, time and humidity conditions. Hassoun and Al-Manaseer [22] highlighted that methods of mixing, compaction and curing affect the compressive strength. Proper mixing time, the use of appropriate concrete mixers and the right use of vibrators have a positive effect on concrete by increasing its compressive resistance, which is the consequence of having a uniform mixture and reducing voids. Curing moisture and temperature also play an important role in the strength of concrete, since the hydration of cement depends on them.

In recent studies about concrete strength variability, Unanwa and Mahan [23] stated that strength variation is due to concrete placement, consolidation and curing methods (i.e., curing temperature and humidity), and Chen et al. [24] suggested that special attention should be paid to temperature and humidity when producing, placing and curing concrete, implying that concrete strength may be affected after mixing its component materials until it is finally placed.

Table 1. Unstructured factors identified in the literature summarizes the preliminary construction site factors (unstructured factors) that affect concrete, as identified through the literature. However, relevant literature did not reveal the significance or effects of these unstructured factors on the concrete final product in terms of compressive strength, cost and production.

TABLE 1. Unstructured factors identified in the literature

Source	Factors
Kosmatka et al. [4]	1. Mixing time 2. Segregation 3. Compaction 4. Adding extra water 5. Flattening surfaces (Finishing) 6. Curing temperature 7. Curing humidity 8. Ambient temperature
Mehta and Monteiro [5]	1. Compaction 2. Curing temperature 3. Curing humidity
Neville and Brooks [1]	1. Compaction 2. Ambient temperature 3. Mixing time 4. Curing temperature 5. Curing humidity
Li [21]	1. Mixing time 2. Curing temperature 3. Curing humidity
Wight et al. [20]	1. Segregation 2. Compaction
Hassoun and Al-Manaseer [22]	1. Mixing time 2. Compaction 3. Curing humidity 4. Curing temperature
Unanwa and Mahan [23]	1. Segregation 2. Compaction 3. Curing temperature 4. Curing humidity
Chen et al. [24]	1. Segregation 2. Curing temperature 3. Curing humidity



Table 1. Unstructured factors identified in the literature shows that researchers agreed on several factors that affect concrete compressive strength. These studies assumed that concrete was made by laborers with experience or expertise fabricating concrete; construction workers with appropriate skills must be hired in order to ensure the success of a project [25]. Therefore, crew experience could be another unstructured factor that affects concrete quality variability. Table 2 shows a compiled list of preliminary unstructured factors considered in this study. The factors are listed in no particular order.

TABLE 2. Preliminary unstructured factors

Number	Identified Factor
1	Mixing time
2	Compaction
3	Ambient temperature
4	Curing temperature
5	Curing humidity
6	Adding extra water when mixing
7	Crew experience

Regarding the number of factors that may affect concrete, Day [26] appealed to Pareto's principle to say that 70% to 80% of the total variability in concrete strength is caused by two or three factors. The author suggested that strength variability is caused by less than ten factors, which is in agreement with what has been found elsewhere in the literature.

Finally, literature regarding factors that affect concrete compressive strength during its production until its final placement is limited. Most of the literature focuses on well known structured factors regarding concrete component properties and material proportions (e.g., water-cement ratio), and while the literature identifies unstructured factors, their impact on quality, cost and production has not been quantified.

Survey

Surveys are well-recognized tools that allow us to infer valuable knowledge about a population through the collection of quantitative and qualitative data, as long as the sample size chosen is representative of the actual population. The main purpose of any survey is to build quantitative descriptors (statistics) to summarize the observations [27]; however, survey variables will always contain bias due to nonresponses or measurements errors [28].

Groves et al. [27] stated that a survey should meet the following criteria to minimize errors: (1) respondents must describe their characteristics accurately, and; (2) respondents must be representative of the larger population. Meeting this criterion does not imply that survey statistics are error-free; errors of observation and non-observation will still be present in the results [27].

Thus, a survey was designed considering such criteria, and it was deployed online to a large group of construction experts in Ecuador who had at least one year of experience with concrete in the construction industry or academia. Survey respondents included members from professional associations of civil engineers and architects and from educational organizations such the School of Civil Engineering and Architecture of the Central University of Ecuador. This ensured that the respondents met the “expert” criteria. The study was granted an exemption through the pertinent Institutional Review Board (IRB) prior to conducting the investigation. The survey included a set of questions for identifying and ranking unstructured construction site factors that could affect concrete quality, costs and production rates during the construction process, as well as questions regarding concrete quality metrics and respondents’ characteristics such as profession and construction experience.

Even though construction practices such as normal concrete fabrication at the jobsite are highly dependent on local and regional conditions, the questionnaire was intended and designed to explore construction site factors that are usually present when performing concrete operations regardless the location of the project. Regarding sample population, Ecuadorian construction practices regarding making concrete by hand at the jobsite are very similar to American practices since the Ecuadorian building code (NEC) and the Ecuadorian standards (NTE INEN) are based on the ACI building code and ASTM standards respectively, reducing possible limitations or significant bias on the results of this study. With respect to ready mixed concrete, prestressed construction or prefabrication, they are beyond of the scope of this study.

The survey was deployed online using the Qualtrics platform, and it was distributed to a group of approximately 5,000 active construction experts through their own organizational mailing list manager. The sample size of 297 valid responses ensured a confidence level of 95%. In addition, validation questions were included in the survey, to prevent respondents from answering survey questions randomly.

Sample Description

A total of 333 responses were collected during June and July of 2016 after deploying the online survey to construction experts. Out of the 333 total responses, 297 were valid. The sample exceeded the required sample size by 200 since only 97 valid responses were required to obtain a confidence level of 95% and a confidence interval of 10%, implying that the actual confidence interval was as low as 6%. Most of the respondents (more than 75%) were between 26 and 55 years old, and almost all of them (95.4%) had completed their college education. Since the survey was deployed to “construction experts” from professional organizations and academia, laborers were not included. Superintendents and foremen were included because it is necessary to have a college degree (in architecture or engineering) to work as a superintendent or foreman in Ecuador. The great majority of the respondents (80.1%) had a degree in engineering, while architects and contractors accounted for 17.5% of the respondents. Around 81% of the respondents had more than 5 years of experience in the construction industry and 69.8% of all the construction experts had their main field of expertise focused on construction. Also, 65.4% of all respondents worked on constructing buildings and houses. As can be inferred from the descriptors of the sample, the respondents had



important expertise regarding the use of concrete as a construction material in building and housing projects, and transportation and hydraulic facilities.

For each of the factors in Table 2, respondents provided their perception of the impacts of unstructured factors on compressive strength, cost and production rates, using the following Likert scale: (1) no impact, (2) very low impact, (3) low impact, (4) medium impact, (5) high impact and (6) very high impact.

Data Analysis

RII was used to identify and evaluate the importance of the unstructured factors. Tests for equality of odds were performed by using Likert response aggregation to understand the influence of the respondents' characteristics on their perceptions of the impact of unstructured factors on concrete [37]. The data collected will provide additional information about current practices and mitigation actions for future studies.

Relative Importance Index (RII)

RII can be applied for ranking construction-related affecting factors when using a Likert-type scale [29–36]. A six-point scale ranging from 1 (None) to 6 (Very High) was adopted to determine the impact of unstructured factors on compressive strength, costs and production rates. RII ranges from 0 to 1 and is calculated as in Eq. 1, where w_i is the weighting given to each factor by the respondents (1 to 6), w_{max} is the highest weight (i.e., 6) and N is the total number of respondents. The higher the RII, the higher the ranking and the perceived importance of the affecting factor.

$$RII = \frac{\sum w_i}{A \cdot N} \quad (1)$$

Likert Response Aggregation

Siegel and Castellan [37] suggested a procedure for aggregating Likert-type responses into only two values, allowing us to build up data for comparing the responses of two groups of participants with different characteristics [17]. In this way, construction experts' agreement to a particular state (e.g., high and very high impact) could be separated from others. The Likert aggregation process is illustrated in Fig. 3. It consists of adding together the responses with very high (VH) and high (H) impacts as well as the responses with None (N), Very Low (VL), Low (L) and Medium (M) impacts in order to compile each Likert response into only two values: (VH+H) and (N+L+VL+M). This approach was used because the intent was only to study factors perceived to affect concrete highly (VH+H).

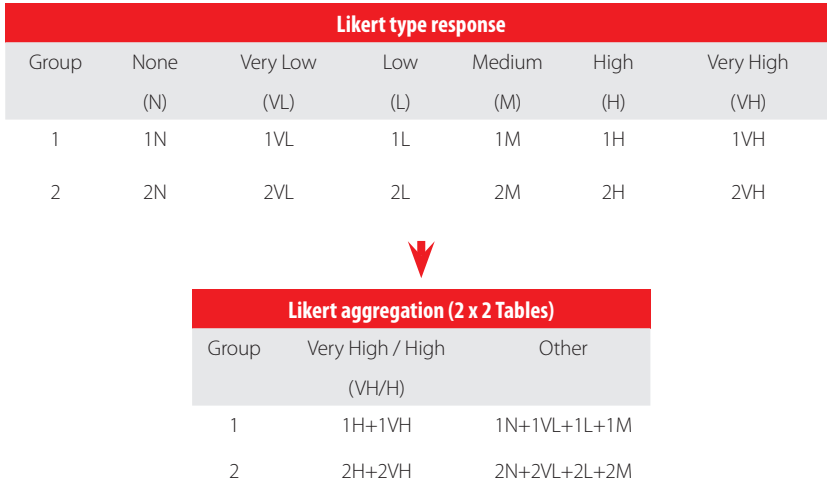


FIGURE 3. Likert response aggregation process

Tests for Equality of Odds

Contingency tables (2x2 tables) containing the responses of two categorical variables are appropriate instruments to explore the relationship between two categorical variables with natural ordering [38] and are used for performing chi-square tests of association between variables (two way tables). This test for equality of odds allows us to compare two different groups and determine if a response differs regarding the same question.

The odds ratio is then used to compare the effect of each level of a categorical variable on the estimated probability. Ramsey and Schafer [39] described shortcut methods for estimating the odds ratio in such a table and the corresponding confidence interval. The odds ratio is computed as the ratio of the products of the main diagonals of the 2x2 table as shown in Eq. 2, and the confidence interval (CI) is calculated by using a shortcut method for the standard error (SE) of the log odds ratio. SE is the square root of the summation of the four reciprocals of a 2x2 table (Eq. 3) and the 95% CI is obtained from the antilogarithm of the end points of the 95% CI for the log odds ratio (Eq. 4).

$$Odds\ ratio = \frac{(1H+1VH)(2N+2VL+2L+2M)}{(2H+2VH)(1N+1VL+1L+1M)} \tag{2}$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{x_{12}} + \frac{1}{x_{22}} + \frac{1}{x_{21}} + \frac{1}{x_{11}}} \tag{3}$$

$$95\% CI\ for\ the\ log\ odds\ ratio = \ln(Odds\ ratio) \pm 1.96(SE) \tag{4}$$



RESULTS

Concrete Quality Metric

The results indicated that concrete compressive strength is the metric used by most of the respondents (89.6%) for measuring concrete quality (Fig. 4) regardless of the type of facility or application, which is an expected result, confirming findings from the literature search. Thus, compressive strength is an appropriate quality metric to use in this study.

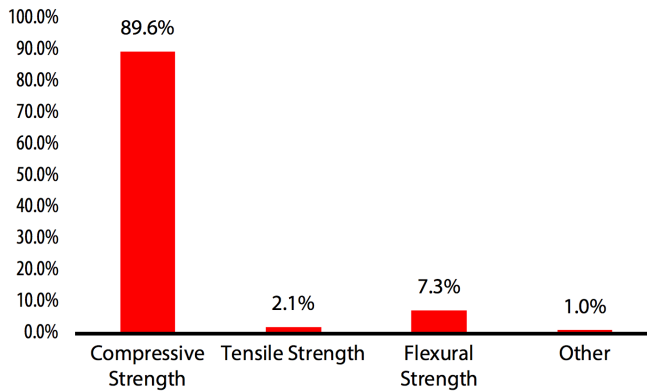


FIGURE 4. Concrete quality metric

Perceived Importance of Unstructured Factors

As previously mentioned, survey respondents were asked to assess the importance of unstructured factors identified in Table 2 considering their perceived degree of impact on concrete compressive strength, costs and production rates through a Likert type scale. Importance indexes for each affecting factor, computed by using Eq. 1, were employed to evaluate the perceived importance of the unstructured factors and to establish the ranking of the unstructured factors.

Table 3 comprises RII values for each identified affecting factor, allowing us to establish lists of affecting factors in descending order. The numbers in parentheses represent the corresponding importance, with 1 being the most important. Thus, the higher the RII, the higher the importance.

Curing humidity, crew experience and compaction are the top three factors affecting concrete compressive strength according to the respondents (Table 3). Regarding concrete costs and production rates, crew experience, mixing time and compaction lead the ranking list of the unstructured factors affecting concrete. Notice that crew experience and compaction are common perceived factors that greatly influence concrete, revealing that construction experts are aware that the use of qualified workers and appropriate equipment are crucial to concrete fabrication. Also, almost all respondents indicated that unstructured factors do affect concrete costs somehow.

Only a very small percentage (1.9%) stated that unstructured factors do not have any effect on concrete cost. In addition, experts pointed out that curing conditions, mixing time and compaction should be paid special attention to ensure concrete quality and meet budget specifications (i.e., costs and production).

A global ranking of importance for the identified unstructured factors was calculated by compiling all responses (Table 4), giving the same weight for compressive strength, costs and production rates. Crew experience, compaction and mixing time are found to be the top three affecting factors perceived to influence concrete during the construction process. On the other hand, adding extra water (via rain) and ambient temperature are perceived to be the least affecting conditions when performing concrete operations.

Although the differences in the results for RIIs are small as it can be seen from Table 3 and Table 4, RII is the accepted methodology to rank the unstructured factors identified in the literature based on their mathematical values. If significant difference in the response is desired, statistical hypothesis testing should be carried out.

TABLE 3. Impact of unstructured factors on concrete compressive strength, costs and production

Number	Identified Factor	RII		
		Compressive strength as a quality metric	Costs	Production
1	Mixing time	0.722 (6)	0.649 (3)	0.682 (2)
2	Compaction	0.753 (3)	0.654 (2)	0.649 (3)
3	Ambient temperature	0.686 (7)	0.534 (6)	0.616 (5)
4	Curing temperature	0.746 (4)	0.634 (5)	0.559 (7)
5	Curing humidity	0.792 (1)	0.635 (4)	0.612 (6)
6	Adding extra water	0.743 (5)	0.514 (7)	0.637 (4)
7	Crew experience	0.781 (2)	0.765 (1)	0.763 (1)

TABLE 4. Overall ranking importance of identified unstructured factors for concrete compressive strength, costs and production

Rank	Identified Factors	RII
1	Crew experience	0.7695
2	Compaction	0.6854
3	Mixing time	0.6846
4	Curing humidity	0.6798
5	Curing temperature	0.6465
6	Adding extra water	0.6315
7	Ambient temperature	0.6120



Comparison of Responses by Group

Architects and engineers accounted for 94.6% of the respondents. Chi-square tests of association between variables using 2x2 tables (Fig. 3) and Ramsey and Schafer [39] shortcut methods for estimating odds ratios and confidence intervals were utilized to analyze the data. A summary of the odd ratios, confidence intervals and p values for the perceptions of architects (Group 1) and engineers (Group 2) regarding the impact of identified unstructured factors on concrete strength, cost and production rates is presented in Table 5.

As shown in Table 5, with respect to mixing time, architects were 2.59, 2.93 and 3.60 times more likely than engineers to perceive a very high or high impact of mixing time on concrete strength, cost and production rates. In all cases the p values (0.009, 0.001 and 0.000) are less than 0.05. For ambient temperature, for example, p values for the impact on concrete strength and costs are greater than 0.05, indicating that there is not enough evidence that the odds ratio differs from 1, and thus no conclusion can be inferred from such comparisons in this case. Therefore, for all odds ratios that are greater than 1 and p values less than 0.05, it can be inferred that architects are more likely to perceive high or very high impacts of such unstructured factors on concrete than engineers do.

In practice, the aforementioned results are of importance to construction practitioners since architects were found to be the technicians who are more likely to ring the bell about the potential impact of unstructured factors on concrete when fabricating concrete in-situ. However, this does not mean that engineers are not able to identify such impacts. Engineers do recognize and warn such adverse conditions but perceive them with less impact. The results shown in Table 5 simply point out the perception of architects and engineers regarding several concrete affecting conditions. The difference in perception between architects and engineers suggests that the characteristics of a group such as profession may determine their response.

TABLE 5. Comparison of responses by architects and engineers regarding the impact of unstructured factors on concrete strength, costs and production

Impact	Odds Ratio	95% CI		p value
Mixing Time				
Strength	2.59	1.25	5.37	0.009
Cost	2.93	1.50	5.74	0.001
Production	3.60	1.78	7.25	0.000
Crew Experience				
Strength	2.60	1.19	5.66	0.014
Cost	3.14	1.44	6.83	0.003
Production	4.09	1.82	9.19	0.000
Compaction				
Strength	3.25	1.49	7.07	0.002

Impact	Odds Ratio	95% CI		p value
Cost	3.66	1.84	7.30	0.000
Production	4.83	2.38	9.77	0.000
Curing Temperature				
Strength	2.50	1.20	5.19	0.012
Cost	3.97	2.02	7.82	0.000
Production	0.80	0.36	1.77	0.587
Curing Humidity				
Strength	2.55	1.17	5.57	0.015
Cost	4.25	2.13	8.50	0.000
Production	0.59	0.27	1.29	0.179
Adding Extra Water				
Strength	2.98	1.41	6.33	0.003
Cost	0.72	0.33	1.58	0.412
Production	5.43	2.68	11.01	0.000
Ambient Temperature				
Strength	1.85	0.96	3.58	0.064
Cost	0.60	0.25	1.43	0.247
Production	2.60	1.34	5.03	0.004

Identification of Additional Unstructured Factors

In addition to the unstructured factors identified in the literature and shown in Table 2, construction experts were asked to identify additional unstructured factors recognized throughout their careers. Only 23% of the respondents provided additional factors. They are listed in Table 6 and categorized into workforce, machinery and equipment, jobsite environment and concrete fabrication process. These additional factors are of importance for construction practice since they provide construction practitioners with more information tending to reduce uncertainties when fabricating concrete, facilitating the decision making process. Thus actions tending to preserve concrete product could be made on time, avoiding delays and cost overruns.

Additionally, a recommendation for further research is given in the corresponding section since including these factors on a new survey could influence the results; however, the authors believe that the results would not change significantly.



TABLE 6. Additional unstructured factors identified by the respondents

Workers	Machinery and Equipment	Jobsite Environment	Concrete Fabrication Process
<ul style="list-style-type: none"> • Deficient formwork • Mixing wrong material quantities • Excess of admixtures • Height of concrete pouring (segregation) • Concrete volume to be made • Type of concrete element to be fabricated 	<ul style="list-style-type: none"> • The use of proper tools when dealing with concrete • Means of concrete transportation 	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminated concrete materials (water and aggregates) • Wind (fast dry of concrete) • Vibrations after concrete setting • Nighttime construction • Aggressive environment (soil - foundations) 	<ul style="list-style-type: none"> • Time of concrete fabrication • Time of concrete placement

Current Practices and Mitigation Actions

Research results show that a significant percentage of construction experts (57.6%) are aware of the presence of unstructured factors during concrete operations, and some preventive actions are carried out to minimize their effects on concrete. When comparing the responses of the two major groups – architects and engineers – regarding the awareness of the existence of unstructured factors by using 2x2 tables, it can be concluded that there is not enough evidence that the odds ratio differs from 1 regarding previous knowledge of such factors. Also, construction experts who are aware of unstructured factors tend to take some mitigation actions during concrete operations.

For example, to prevent the addition of extra water to fresh concrete, the concrete is protected from rain by either avoiding concrete fabrication on rainy days or by using plastic protection. In addition, the use of experienced crews is preferred for concrete production. Survey results suggest that the use of experienced crews when fabricating concrete is preferred to reach concrete compressive strength. A very high percentage of construction experts (91.3%) have utilized experienced crews when dealing with concrete. Regarding curing conditions, 80.9% of respondents did not consider temperature when curing concrete. The only concern was keeping concrete wet (i.e., preserving humidity) due to the difficulty of providing such a controlled environment on the jobsite, and the costs associated with this activity.

Moreover, 28 days is thought to be the period of time necessary for concrete to reach its design capacity by the majority of construction experts (79.1%), which is in agreement with standard acceptance tests; namely, ASTM standards C31 [40] and C39 [41] and the requirements established by The American Concrete Institute [42]. Concrete design strength at the age of 28 days is well known for a construction expert; however, other group of experts believe that less time is necessary when using admixtures or another type of cement.

Even though concrete should not be fabricated in situ due to quality control aspects when fabricated manually, the results indicate that significant amounts of concrete are actually made on the jobsite. Seventy-six percent of the respondents believed that more than 10% of concrete required for a facility is fabricated in situ; they recommended the use of concrete mixers to ensure all ingredients are mixed uniformly. The high percentage of concrete made on the jobsite could be explained due to the perception that ready-mixed concrete is more expensive than concrete fabricated in situ, even though the difference is not that large. This statement should be valid or applicable to developing countries. Although the cost of ready mixed concrete is usually higher than on site mixed concrete, this difference of costs is commonly compensated by the cost of supervisory staff, site organization and amount of cement utilized [1].

Although construction experts accepted that significant amounts of concrete are made on the jobsite, they were aware that concrete quality may be compromised. Most respondents (89.0%) believed that concrete fabricated in a plant (i.e., ready-mixed) and on the jobsite (either mixed by hand or using a concrete mixer) do not have the same quality.

DISCUSSION

In this study, unstructured factors affecting quality (as measured by compressive strength), costs and production rates have been identified in the literature and through the perceptions of construction experts, using a survey instrument. The majority of the participants were Ecuadorians. With respect to concrete compressive strength, curing humidity (RII=0.792), crew experience (RII=0.781) and compaction (RII=0.753) are the top three affecting construction site factors, followed by curing temperature (RII=0.746), adding extra water (e.g., rain) (RII=0.743), mixing time (RII=0.722) and ambient temperature (RII=0.686). Even though the majority of construction experts were aware of the existence of such factors, most of them did not report taking preventive actions to minimize the effects of the factors on concrete. For instance, 80.9% of respondents did not consider curing temperature when curing concrete. However, concreting when raining (which could add extra water to fresh concrete mixtures) was one factor considered during concrete operations by protecting fresh concrete from rain.

In terms of costs, the respondents believed that crew experience (RII=0.765), compaction (RII=0.654) and mixing time (RII=0.649) are the most important factors that affect concrete. Also, construction experts recognized that curing conditions have an important impact on costs, suggesting that taking no mitigation actions against such factors could be due to the significant increase in concrete costs. With respect to production rates, construction experts believed that crew experience (RII=0.763), mixing time (RII=0.682) and compaction (RII=0.649) control concrete productivity, agreeing with the saying "time is money". The more resources, the more expensive.

When considering an overall ranking of affecting factors for concrete compressive strength, costs and production, crew experience (RII=0.7695) comes first, followed by compaction (RII=0.6854) and mixing time (RII=0.6846). The least perceived affecting factors are adding extra water (RII=0.6315) and ambient temperature (RII=0.6120).



These global rankings were computed by giving the same weight or importance to compressive strength, costs and production.

In addition to the previous unstructured factors, a small group of construction experts identified other important unstructured factors recognized throughout their careers that may also affect concrete compressive strength, costs and production rates. Such factors were classified according to their source and included deficient formwork, nighttime construction and the use of improper tools when dealing with concrete. These factors should be investigated in future research.

Moreover, the use of 2x2 contingency tables and tests for equality of odds allowed us to understand how profession (being an architect or engineer) can influence respondents' perceptions about the impact of unstructured factors on particular concrete characteristics.

When comparing the two main groups of respondents – architects and engineers – regarding their perceptions of the effect of unstructured factors on concrete compressive strength, costs and production rates, the results indicate that architects are more likely to perceive high or very high impacts than engineers do when judging the effect of an unstructured factor.

Several recommendations for practice based on the results of this study can be given. Concrete practitioners should take into account several unstructured or construction site factors when performing concrete operations at the jobsite in order to prevent concrete product from undesired impacts. The perceived importance of construction-related factors that affect concrete provide practitioners with valuable information so that mitigation actions could be made. The less uncertainty in the information about affecting concrete conditions, the more the chances are for producing concrete having expected characteristics in situ. Also, knowing how construction experts' characteristics (i.e., architects and engineers) influence their perceptions of these factors may assist construction practitioners on the decision making process. Being aware of the effect of the factors that were not considered before can indeed help not only take correction actions to preserve concrete product but also save time and money.

To sum up, unstructured factors should be considered and monitored during concrete fabrication while the construction phase of a facility. This will help ensure that concrete complies with design specifications established in the construction documents. However, additional research is needed to quantify the impact of these factors on concrete.

Even though the population sample was large enough to ensure a high level of confidence in the results in Ecuador, we expected to have similar numbers of construction experts (the sample population) belonging to each of the following groups: architects, engineers, and contractors; in reality, only two major groups – architects and engineers – accounted for 94.6% of the survey sample. Also, architects and engineers were not equally represented. However, most respondents surveyed (80.7%) had more than 5 years of experience in the construction industry and around 92% had experience constructing buildings, houses, transportation and hydraulic facilities.

A major limitation could be that the majority of the respondents belonged to Ecuador, a Latin American developing country, where construction practices may not be similar to those utilized in developed countries. Nonetheless, the concrete code in Ecuador was developed based on the American Concrete Institute principles.

The results revealed that more than 10% of concrete is fabricated on the jobsite; hence it is necessary to investigate how to quantify the effects of construction site factors not only on compressive strength as a concrete quality metric, but also on costs and production rates. Employing inexperienced crews for concrete fabrication, for instance, may increase concrete unit prices by increasing the time needed for performing an activity, diminishing production rates. However, there are some potential challenges and aspects that must be considered when carrying out this proposed research. The method or technique chosen to achieve that goal will depend on the availability of appropriate equipment and laboratories that guarantee the replication of the aforementioned affecting conditions, so that the effect of unstructured factors may be measured reliably.

Furthermore, additional unstructured factors identified by construction experts throughout their careers should be considered in future studies, to identify and evaluate the perceived importance of such additional construction-related factors that affect concrete by construction experts. Lastly, other quality metrics, methods or procedures such as concrete aesthetics should be explored not only for the identification and ranking of unstructured factors but also to study the effect of construction experts' characteristics on their responses.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

Jorge Santamaria conceived the research, conducted the survey, analyzed the data, interpreted the results and wrote the document while Vanessa Valentin, as my major advisor, supervised the research, revised the manuscript critically and collaborated with editing.



REFERENCES

- [1] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete technology* (pp. 242-246). England: Longman Scientific & Technical.
- [2] Okasha, N. M., and Aichouni, M. (2014). Proposed structural reliability-based approach for the classification of concrete quality. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014169. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001131](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001131)
- [3] Portland Cement Association (2015). Cement & concrete applications: Products. *Portland Cement Association*. Recuperado de <http://www.cement.org/cement-concrete-basics/products>
- [4] Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B. & Panarese, W. C. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures (14th ed.)*. Illinois, United States of America: Portland Cement Association.
- [5] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. India: The McGraw- Hill Companies, Inc.
- [6] Demirboğa, R., Örüng, I. & Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627-1632. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00615-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00615-9)
- [7] Jongpradist, P., Jumlongrach, N., Youwaj, S. & Chucheepsakul, S. (2010). Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 49-58. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:1\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:1(49))
- [8] O'Connor, J. T., & Huh, Y. (2006). Crew production rates for contract time estimation: Beam erection, deck, and rail of highway bridges. *Journal of construction engineering and management*, 132(4), 408-415. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2006\)132:4\(408\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:4(408))
- [9] Jarkas, A. M. (2010). Analysis and measurement of buildability factors affecting edge formwork. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1), 142-150.
- [10] Jarkas, A. M. (2012). Buildability factors influencing concreting labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(1), 89-97. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000404)
- [11] Heravi, G., & Eslamdoost, E. (2015). Applying artificial neural networks for measuring and predicting construction-labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(10), 04015032. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001006)
- [12] Yuan, Z., Wang, L.N. & Ji, X. (2014). Prediction of concrete compressive strength: Research on hybrid models genetic based algorithms and ANFIS. *Advances in Engineering Software*, 67, 156-163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advensoft.2013.09.004>
- [13] Rodríguez-Garzón, I., Martínez-Fiestas, M., Delgado-Padial, A., & Lucas-Ruiz, V. (2016). An exploratory analysis of perceived risk among construction workers in three Spanish-speaking countries. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(11), 04016066. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001187](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001187)
- [14] Dai, J., Goodrum, P. M., & Maloney, W. F. (2009). Construction craft workers' perceptions of the factors affecting their productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(3), 217-226. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2009\)135:3\(217\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:3(217))
- [15] Lu, S. & Yan, H. (2013). A comparative study of the measurements of perceived risk among contractors in China. *International Journal of Project Management*, 31(2), 307-312. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.06.001>
- [16] Zhang, P., Lingard, H., Blismas, N., Wakefield, R. & Kleiner, B. (2015). Work-health and safety-risk perceptions of construction-industry stakeholders using photograph-based Q methodology. *Journal of Construction Engineering & Management*, 141(5), 04014093. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000954](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000954)
- [17] Tymvios, N. & Gambatese, J. A. (2016). Perceptions about design construction worker safety: Viewpoints from contractors, designers, and university facility owners. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(2), 04015078. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001067)
- [18] Heeringa, S. G., West, B. T., & Berglund, P. A. (2017). *Applied survey data analysis*. Cleveland, United States of America: Chapman and Hall/CRC.
- [19] Laungrungrong, B., Mobasher, B., Montgomery, D., & Borrer, C. M. (2009). Hybrid control charts for active control and monitoring of concrete strength. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 77-87. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:1\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:1(77))

- [20] Wight, J. K., Richart, F. E. and MacGregor, J. G. (2012). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design (6th ed.)*. New Jersey, United States of America: Pearson Prentice Hall.
- [21] Li, Z. (2011). *Advanced Concrete Technology*. New Jersey, United States of America: Wiley.
- [22] Hassoun, M. N. and Al-Manaseer, A. A. (2012). *Structural Concrete: Theory and Design (5th ed.)*. New Jersey, United States of America: Wiley.
- [23] Unanwa, C. & Mahan, M. (2014). Statistical analysis of concrete compressive strengths for California highway bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(1), 157-167, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.19435509.0000404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.19435509.0000404)
- [24] Chen, X., Wu, S. & Zhou, J. (2014). Variability of compressive strength of concrete cores. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(4), 06014001, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000513)
- [25] Sears, S. K., Sears, G. A., Clough, R. H., Rounds, J. L. & Segner, R. O. (2015). *Construction Project Management: A Practical Guide to Field Construction Management (6th ed.)*, New Jersey, United States of America: Wiley.
- [26] Siegel, J. A., Mirakovits, J. A., and Hudson, B. (2013). *Concrete mix design, quality control and specification*. Cleveland, United States of America: CRC Press.
- [27] Groves, R. M. (2004). In JF Floyd J., MP Couper, JM Lepkowski, E. Singer, and R. Tourangeau (Eds) *Survey Methodology*. New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons.
- [28] Chambers, R. L., and Skinner, C. J. (Eds.). (2003). *Analysis of survey data*. New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons.
- [29] Davies R. & Harty, C. (2013). Implementing site BIM: A case study of ICT innovation on a large hospital project. *AUTCON Automation in Construction*, 30, 15-24.
- [30] El-Gohary, K. M. & Aziz, R. F. (2014). Factors influencing construction labor productivity in Egypt. *Journal of Management in Engineering*, 30(1), 1-9, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000168)
- [31] Gündüz, M., Nielsen, Y. & Özdemir, M. (2013). Quantification of delay factors using the relative importance index method for construction projects in Turkey. *Journal of Management in Engineering*, 29(2), 133-139, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000129](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000129)
- [32] Gunduz, M., Nielsen, Y. & Ozdemir, M. (2015). Fuzzy assessment model to estimate the probability of delay in Turkish construction projects. *Journal of Management in Engineering*, 31(4), 04014055, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000261)
- [33] Jin, R., Hancock, C., Tang, L., Chen, C., Wanatowski, D. & Yang, L. (2017). Empirical study of BIM implementation–based perceptions among Chinese practitioners. *Journal of Management in Engineering*, 33(5), 04017025, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000538](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000538)
- [34] Kometa, S., Olomalaiye, P. & Harris, F. (1994). Attributes of UK construction clients influencing project consultants' performance. *Construction Management and Economics*, 12(5), 433-443.
- [35] Odusami, K. T. (2002). Perceptions of construction professionals concerning important skills of effective project leaders. *Journal of Management in Engineering*, 18(2), 61-67, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(2002\)18:2\(61\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(2002)18:2(61))
- [36] Sambasivan, M. & Soon, Y. W. (2007). Causes and effects of delays in Malaysian construction industry. *International Journal of Project Management*, 25(5), 517-526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.007>
- [37] Siegel, S. & Castellan, N. J. (1988). *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences (2nd ed.)*. New York, United States of America: McGraw-Hill.
- [38] Lavrakas, P. J. (Ed.). (2008). *Encyclopedia of Survey Research Methods*. California, United States of America: SAGE Publications.
- [39] Ramsey, F. L. & Schafer, D. W. (2013). *The Statistical Sleuth: A Course in Methods of Data Analysis (3rd ed.)*. Boston, United States of America: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- [40] ASTM International (2015). *ASTM C31/C31M – 15a: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. Pennsylvania, United States of America: ASTM International.
- [41] ASTM International (2016). *ASTM C39/C39M – 16b: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Pennsylvania, United States of America: ASTM International.
- [42] ACI Committee 318 (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): An ACI Standard: Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)*. ACI Report. Michigan, United States of America: American Concrete Institute.

Localización y reconocimiento de señales de tráfico del Ecuador: Casos Pare y Ceda el Paso

Marco Flores-Calero^{1,2*}, Cristian Conlago³, Jhonny Yunda³, Milton Aldas⁴, Carlos Flores⁵

¹Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Av. Gral. Rumiñahui s/n, PBX 171-5-231B, Sangolquí, Pichincha, Ecuador.

²Departamento de Sistemas Inteligentes, Tecnologías I&H. Latacunga-Cotopaxi, Ecuador.

³Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Av. Gral. Rumiñahui s/n, PBX 171-5-231B, Sangolquí, Pichincha, Ecuador,

⁴Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato campus Huachi, Avenida Los Chasquis y Calle Rio Payamino, Ambato, Tungurahua, Ecuador.

⁵Servicio de Investigación de Accidentes de Tránsito (SIAT) de Cotopaxi, Policía Nacional del Ecuador, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

*Autor para correspondencia / Corresponding author, e-mail: mjflores@espe.edu.ec

Ecuadorian traffic sign localization and recognition: Stop and Yield cases

Abstract

In the world and in Ecuador, the high-rise rates of traffic accidents are caused by the lack of respect for regulations by road users, by generating important human and material costs. In this sense, the localization and recognition of traffic signs is essential for building devices capable of preventing situations that can generate traffic accidents. Therefore, in this work a new system for traffic signs detection is presented using the following innovations: *i*) color segmentation for regions of interest (ROIs) generation based on $k - NN$ with $K_m - means$, *ii*) a new version of the HOG descriptor for feature extraction and *iii*) SVM training for stage multi-classification. The proposed approach has been specialized and tested on Ecuadorian Stop and Yield (Give-way) signs. Many experiments have been carried out over an experimental vehicle in real driving conditions, under different lighting changes such as normal, sunny and cloudy. This system has showed a global performance of 98.7% for segmentation, 99.49% for classification and an accuracy of 96% for detection.

Keywords: Traffic sign, Ecuador, accidents, $K_m - means$, $K - NN$, SVM, HOG

Resumen

En el mundo y en el Ecuador, las altas tasas de accidentes de tráfico son generadas, principalmente, por la falta de respeto a la normativa vial por parte de los usuarios viales, generando costos humanos y materiales de importancia. En este sentido, la localización y el reconocimiento de las señales de tráfico es esencial para la construcción de dispositivos capaces de prevenir situaciones que puedan generar accidentes de tráfico. Por lo tanto, en este trabajo se presenta un nuevo enfoque para la construcción de un sistema para la detección de señales de tráfico, usando las siguientes innovaciones, *i*) un método de segmentación por color para la generación de regiones de interés (ROIs) basado en los

algoritmos $k - NN$ con $K_m - means$, **ii**) una nueva versión del descriptor HOG (Histograms of oriented gradients) para la extracción de características, y **iii**) el entrenamiento del algoritmo SVM no-lineal para multi-clasificación. El enfoque propuesto ha sido probado sobre las señales de tráfico ecuatorianas de Pare y Ceda el Paso. Un sin número de experimentos han sido desarrollados sobre varias secuencias de videos capturadas con un vehículo experimental en condiciones reales de conducción en varias ciudades ecuatorianas, bajo diferentes condiciones de iluminación como son normal, soleado y nublado. Este sistema ha mostrado un rendimiento global de 98.7% para la segmentación, 99.49% para la clasificación y una precisión del 96% para la detección.

Palabras clave: Señales de tráfico, Ecuador, accidentes, $K_m - means$, $K - NN$, SVM, HOG.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el Ecuador dispone de la mejor red vial de Suramérica [1], sobre ésta se ubican las señales de tráfico reglamentarias de Pare y Ceda el Paso, preferentemente, en las intersecciones viales, redondeles y aproximaciones por vías secundarias. A pesar de esta importante infraestructura, durante en el año 2015, el 13.75% de todos los accidentes de tráfico sucedieron en las intersecciones viales [2] generando el 8.14% de las personas fallecidas bajo este percance.

Por ello los sistemas de detección de señales de tráfico (SDST) toman cada vez mayor importancia [3], [31] para reducir los accidentes de tráfico [4]. Sin embargo, estos sistemas aún están lejos de ser perfectos, y deben ser especializados por países, adaptados a las particularidades del diseño de la señalética de tráfico de cada nación [5].

Por lo tanto, en esta investigación se presenta un SDST especializado en dos tipos de señales del Ecuador como son Pare y Ceda el Paso. Para su implementación se han utilizado modernas técnicas de visión por computador e inteligencia artificial con el fin de cubrir todos los casos que se presentan en la conducción durante el día, como son: variabilidad de la iluminación, oclusión parcial y deterioro de las señales.

Este documento está organizado de la siguiente manera. La primera sección corresponde a la motivación que ha generado esta investigación, donde además se incluyen los trabajos previos en la detección de señales de tráfico presentes en la literatura. A continuación, el apartado dos describe un nuevo sistema para la detección de señales de tráfico para el caso de las señales de tráfico ecuatorianas de Pare y Ceda el Paso. La siguiente sección exhibe los resultados experimentales en condiciones reales de conducción. Finalmente, la última parte está dedicada a las conclusiones y los trabajos futuros.

Para la detección automática de las señales de tráfico se suele dividir al problema en dos partes, segmentación/detección y reconocimiento/clasificación [6]. En el primer caso, una de las características predominantes, en el espectro visible, es el color, donde se han utilizado espacios de color y distintas técnicas de visión por computador para generar regiones con alta posibilidad de contener una señal de tráfico. En el segundo escenario,



se han utilizado algunos métodos para la extracción de características en conjunto con un algoritmo de aprendizaje-máquina [7–9], para así clasificar y reconocer las señales.

Segmentación para la generación de ROIs: La mayoría de las técnicas basadas en color buscan ser robustas frente a las variaciones de iluminación. Así Salti et al. [10] han utilizado tres espacios de color derivados de RGB, el primero para resaltar las señales de tráfico con predominancia de los colores azules y rojos, el segundo es para las señales con rojo intenso y el tercero para los azules vivos. Li et al. [11] han construido un espacio donde resaltan los objetos dominados por los colores azul-amarillo y verde-rojo, sobre el cual, utilizando el algoritmo de agrupamiento K-means [12] construyen un método de clasificación por color para la generación de ROIs. Nguyen et al. [3] han utilizado el espacio HSV con varios umbrales para generar un conjunto de ROIs buscando colores rojos y azules. Lillo et al. [13] han utilizado los espacios $L^*a^*b^*$ y HSI para detectar señales donde predominan los colores rojo, blanco y amarillo, usando las componentes a^* y b^* han construido un clasificador para estos colores. Chen and Lu. [14] han utilizado multi-resolución y técnicas AdaBoost para fusionar dos fuentes de información, visual y localización espacial; en la visual construyen dos espacios de color basados en RGB denominados mapas salientes de color, en la espacial han usado el gradiente con distintas orientaciones. Finalmente, Han et al. [15] han usado la componente H del espacio HSI, donde han generado un intervalo, donde resaltan las señales de tráfico, para construir una imagen en grises donde se localizan las ROIs.

Clasificación/Reconocimiento: Esta etapa se divide en dos partes: *i)* método de extracción de características y, *ii)* elección del algoritmo de clasificación.

En el primer caso se tiene una amplia variedad de propuestas. Así Salti et al. [10], Huang et al. [16], Shi and Li [35] han utilizado el descriptor HOG [17] con tres variantes especializadas en señales de tráfico. Li et al. [11] han usado el descriptor PHOG, que es una variación de HOG. Lillo et al. [13] han implementado la extracción de características usando la transformada discreta de Fourier. Han et al. [15] utilizaron el método SURF (Speeded Up Robust Features) [18]. Chen and Lu. [14] han utilizado DSC (Discriminative Codeword Selection) iterativo para la generación de características. Mongoose et al. [5] han implementado ICF (Integral Channel Features) and ACF (Aggregate Channel Features). Pérez et al. [6] usaron PCA (Principal Component Analysis) para la reducción de la dimensión y la elección de características. Finalmente, Lau et al. [19] usaron una ponderación de los píxeles vecinos.

En la segunda cuestión, los algoritmos preferidos son: SVM [9], [12], usado en los trabajos de Salti et al. [10], Li et al. [11], Lillo et al. [13] y Shi and Li [35]. SVR en Chen and Lu [14], $k - NN$ [12] implementado en las investigaciones de Han et al. [15]. Redes neuronales artificiales, empleadas por Huang et al. [16] con el caso ELM (Extrem Learning Machine) y Pérez et al. [6] con la implementación MLP (Multi-Layer Perceptron). Adaboosts con árboles de decisión utilizados en el trabajo de Mogelmosse et al. [5].

En los últimos años, las técnicas basadas en aprendizaje profundo van ganando mayor importancia, tanto es así que CNN (Convolutional Neural Network) y sus variaciones están siendo utilizadas para la clasificación automática, donde el vector de características se extrae sin intervención humana, en este caso están Lau et al. [19] y Zhu et al. [20]. Zuo et al. [32].

Bases de datos: Cada país tiene sus propias normativas en cuanto a la señalética de tráfico, dividida en las categorías de informativas, obligatorias, prohibitivas y advertencia [5], [10], [13], [14], [20]. En la actualidad, las principales bases de datos corresponden a países como Alemania [6], [10], [16], Italia [10], España [13], Japón [3], Estados Unidos [5], Suecia [20] o Malaysian [19]. Esto demuestra que no existe información de los países en desarrollo, como es el caso del Ecuador, en lo que respecta a las señales de tráfico ni de la infraestructura vial; esto genera un reto para levantar este tipo de información relevante para la seguridad vial.

Sistemas comerciales: Las empresas del sector automotriz están desarrollando prototipos para la detección de señales de tráfico, dos de ellas son Mobileye [33], y Continental [34]. Con estos sistemas, estas empresas están incursionando en el campo de la conducción autónoma y los vehículos inteligentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

El esquema del sistema propuesto se presenta en la Figura 1, donde están las etapas de segmentación (localización) y reconocimiento (clasificación). En el proceso de segmentación se genera un conjunto de ROIs, que será enviado a la etapa de clasificación para su reconocimiento. En esta propuesta únicamente se trabaja en el caso restringido de las señales de tráfico Pare y Ceda el Paso que forman parte de las señales de prohibición.

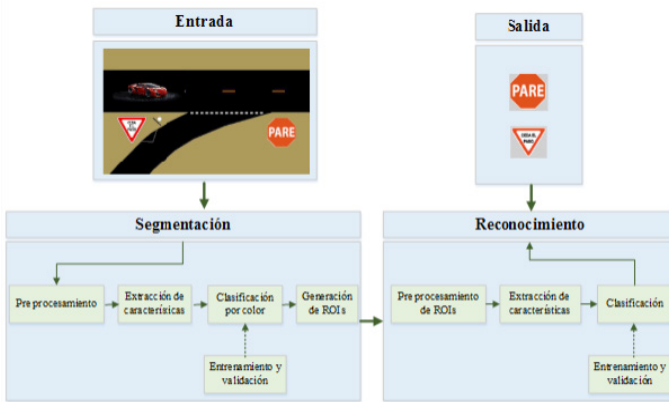


FIGURA 1. Esquema propuesto para la localización y reconocimiento de señales de tráfico en intersecciones viales en el Ecuador, para los casos Pare y Ceda el Paso.

A. Segmentación y generación de ROIs

La segmentación se realiza discriminando el color rojo del fondo, es decir, del resto de colores. Experimentalmente se ha elegido el espacio de color RGB Normalizado (RGNB)

porque presenta una distribución más compacta en los canales Bn y Gn , cuyos valores se encuentran en los intervalos y respectivamente. La Figura 2(a) muestra las distribuciones de las clases, donde el rojo representa la clase de interés y el azul identifica la clase de no interés. La Figura 1 (izquierda) muestra el esquema de segmentación que se describe a continuación.

- 1. Puntos representativos:** Para generar un número reducido de puntos representativos de cada clase se utiliza el algoritmo de agrupación K_m - means [8]; de esta manera, se obtienen K_m centroides para cada una de las clases.

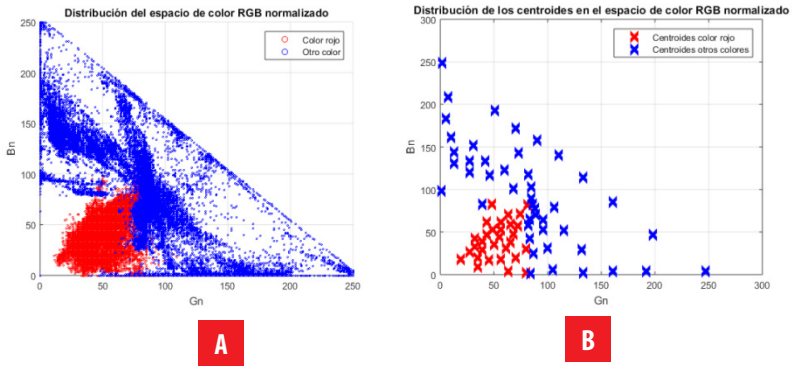


FIGURA 2. Distribución del color en el espacio RGB normalizado, **A** clases de interés y no interés, **B** centroides generadas con K_m - means.

Utilizando los métodos de Calinski- Harabasz [21], Davies-Bouldin [22], Gap [23] y Silhouettes [24] se ha llegado a determinar el valor eficiente de K_m , obteniendo los valores de γ para las clases rojo y no rojo (otros colores), respectivamente. La Figura 2(b) muestra los centroides de las dos clases. Para generar esta figura se han utilizado muestras en tres condiciones de iluminación: soleado, normal y obscuro.

- 2. Diseño clasificador k - NN:** Para diseñar este clasificador es importante elegir un valor de k adecuado usando el valor del área bajo la curva (AUC) de la curva ROC [25] generada para cada valor entre 1 y 8. La Tabla 1 muestra los resultados para elegir el mejor valor de k .

TABLA 1: Elección del parámetro K en K - NN.

k	1	2	3	4	5	6	7	8
AUC	0.985	0.931	0.986	0.987	0.985	0.983	0.982	0.983

- 3. Post-procesamiento de cuerpos:** Posteriormente, utilizando los operadores morfológicos de dilatación y erosión [26] se eliminan los cuerpos que no cumplen con características específicas de tamaño para ser candidatos a señales de tráfico.

- 4. Restricciones geométricas:** Finalmente se eliminan los cuerpos que no cumplen la relación alto/ancho, usando umbrales determinados experimentalmente, ver Tabla 2.

TABLA 2: Características geométricas que debe cumplir una ROI en una imagen de tamaño 640x480.

Característica	Valor mínimo	Valor máximo
Área	400 píxeles	10000 píxeles
Relación ancho / alto	0.6	1.4
Distancia de referencia	20 metros	5 metros

B. Reconocimiento

En esta etapa se clasifican las ROIs provenientes de la etapa de segmentación, para determinar si corresponden a una señal de Pare, Ceda el Paso u otro objeto.

La Figura 1 (derecha) muestra el esquema de reconocimiento, que consta de las siguientes partes:

- 1. Pre-procesamiento de los candidatos:** Se transforma las imágenes correspondientes a las ROIs a escala de grises, después se normalizan al tamaño 32 x 32 píxeles y se realiza la ecuilización del histograma para obtener una imagen con una distribución uniforme de los niveles de gris y así aumentar el contraste.
- 2. Extracción de características:** Se utiliza una nueva versión del descriptor HOG [27] para encontrar las características representativas de una señal de tráfico. La innovación desarrollada sobre este descriptor se centra en variar el tamaño de las celdas y las orientaciones, y encontrar la mejor combinación. En este sentido, las celdas toman valores de 2 x 2, 4 x 4, 8 x 8, 16 x 16 píxeles como se muestra en la Figura 3. La orientación se obtiene dividiendo al rango de orientación sin signo de [-90° ; 90°] ó $[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ en 3, 6, 9, 12 y 15 intervalos. Sobre esta gama de parámetros se escoge la mejor opción usando el AUC [25].
- 3. Entrenamiento del clasificador:** Se utiliza SVM [7]–[9] con tres núcleos diferentes: lineal, polinómico y RBF. Para el entrenamiento se usan tres conjuntos de datos que corresponden a las señales Pare, Ceda el Paso y otros elementos que no pertenecen a los casos anteriores.

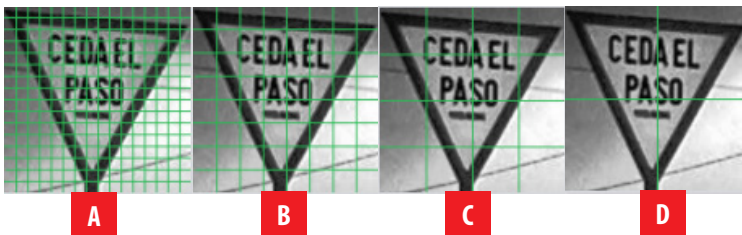


FIGURA 3. Variación del tamaño de celda sobre imágenes de tamaño 32x32 píxeles:
A 2x2, **B** 4x4, **C** 8x8 **D** 16x16.



En total se evalúan 60 casos combinando los puntos 2 y 3, de los cuales se extraen los que generan mejores resultados en la siguiente sección.

RESULTADOS

A. Sistema de percepción y procesamiento

El sistema de detección de señales de tráfico total se presenta en la Figura 4, el mismo que está compuesto por una cámara USB (1), una pantalla de visualización (2) y un computador de procesamiento (3), todo esto, montado sobre el vehículo experimental ViiA, que incorpora una fuente de poder 12V-120AC (4), para alimentar el sistema.



FIGURA 4. Sistema de detección de señales de tráfico del Ecuador, en los casos Pare y Ceda el paso.

Actualmente, este sistema es de fácil instalación en cualquier tipo de vehículo y no interfiere con las labores de conducción, debido a su reducido tamaño.

B. Base de datos de entrenamiento, validación y experimentación

Las bases de datos de entrenamiento y de validación han sido construidas con imágenes de señales de tráfico del Ecuador, tomadas en las ciudades de Latacunga, Quito y Sangolquí, en distintas condiciones de iluminación durante el día. Estas condiciones corresponden a los casos de normal, soleado y nublado. En la Tabla 3 se indica el tamaño de los conjuntos de entrenamiento y de validación obtenidos por medio del método de Holdout [28] y en la Figura 5 se observan varios ejemplos positivos y negativos.

TABLA 3. Tamaño de los conjuntos de entrenamiento y validación por tipos de señal.

	Número de muestras			Total
	Pare	Ceda el Paso	Negativas	
Entrenamiento	700	700	2800	4200
Validación	300	300	1200	1800
Total	1000	1000	4000	6000

Para incrementar el tamaño del conjunto de entrenamiento se rotaron aleatoriamente las imágenes hasta obtener un total de cinco veces el tamaño original. De esta manera se incrementa la variabilidad de la base de datos.



FIGURA 5. Ejemplos de la base de datos de señales de tráfico del Ecuador en distintas condiciones de iluminación y de estado. **A** Pare **B** Ceda el Paso **C** ejemplos negativos

Posteriormente para verificar el funcionamiento del sistema se construyó una base de datos con vídeos en situaciones reales de conducción, en el espectro visible. Esta base está constituida por cinco ejemplares en diferentes condiciones de iluminación, donde las señales han sido localizadas manualmente con fines de evaluación [25].

C. Análisis de resultados

- Para el caso de la segmentación por color, el algoritmo de clasificación genera un AUC de 0.986, con $k = 4$ y $K_m = 30$ para la clase de color rojo y $k = 3$ y $K_m = 40$ para la clase otros colores.
- Para el caso de la clasificación, los mejores parámetros del descriptor HOG son: celdas de 8×8 píxeles, bloques de 2×2 celdas con solapamiento simple, orientaciones sin signo y SVM polinomial de parámetros $C = 215$, $r = 0$, $d = 3$, $\gamma = 1/m$, con m es el tamaño del vector de características. En la Tabla 4 se presentan los resultados para el caso de 8×8 píxeles, donde el mejor resultado se encuentra resaltado.



TABLA 4. Resultados de clasificación con características HOG con celdas de 8x8 píxeles en todas las orientaciones.

Orientaciones	Tipo de núcleo		
	Lineal	Polinómico	RBF
3	0.9603	0.9913	0.9755
6	0.9784	0.9947	0.9834
9	0.9798	0.9949	0.9784
12	0.9762	0.9921	0.9827
15	0.9834	0.9971	0.9819

Para medir la capacidad de detección, la curva DET [30], que gráfica la tasa de falsos negativos (taza de pérdida) versus la tasa de falsos positivos, en escala logarítmica en el rango de 0.01-1, se presenta en la Figura 6, en ella se observa que el mejor desempeño se realiza en días normales con una tasa de pérdidas del 13 y la peor ejecución es en días soleados con una tasa de pérdidas del 28, esto se puede observar en la Tabla V.

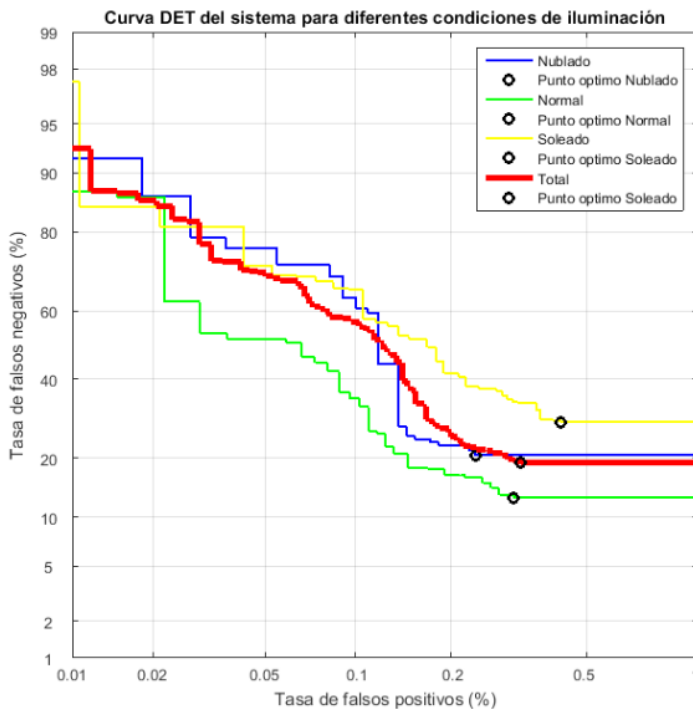


FIGURA 6. Curva DET del sistema de detección de señales de tráfico.

El sistema tiene un excelente desempeño, con una precisión del 96. Varios ejemplos generados por el sistema se lo observan en la Figura 7 y la Figura 8.

TABLA 5. Resultados del sistema de detección de señales de tráfico en diferentes escenarios de iluminación durante el día.

	TRP ^a	TFN ^b	TRN ^c	TFP ^d	Exactitud	Precisión
Día normal	0.87	0.13	0.997	0.003	0.98	0.97
Día soleado	0.72	0.28	0.995	0.005	0.97	0.90
Día nublado	0.79	0.21	0.997	0.003	0.97	0.96
Sistema total	0.81	0.19	0.997	0.003	0.98	0.96

^aTasa de Reales Positivos, ^bTasa de Falsos Negativos
^cTasa de Reales Negativos, ^dTasa de Falsos Positivos



FIGURA 7. Resultados del sistema de detección de señales de tráfico en los casos Pare y Ceda el Paso, durante un día soleado; **A** imagen de entrada, **B** ROIs y **C** detecciones.



FIGURA 8. Resultados del sistema de detección de señales de tráfico en los casos Pare y Ceda el Paso, durante un día obscuro; **A** imagen de entrada, **B** ROIs y **C** detecciones.

D. Tiempos de cómputo

En la Tabla 6 se presenta el tiempo de cómputo del sistema total. Estos resultados son los valores promedios del procesamiento de 37185 (distribuidos de la siguiente manera 9999 en soleado, 14744 en normal y 12442 en nublado) imágenes de tamaño 640 × 480 píxeles.

TABLA 6. Tiempos de cómputo total del sistema de detección de señales de tráfico del Ecuador en los casos Pare y Ceda el Paso.

Etapa	Tiempo promedio (ms)
Captura	1.75
Segmentación	28.79
Reconocimiento	14.05
Visualización	1.75
Tiempo total	46.34

Esto demuestra que el sistema es capaz de trabajar en tiempo cuasi-real, es decir, puede procesar aproximadamente 21 imágenes por segundo.

DISCUSIÓN

En este trabajo de investigación se aportó con la construcción de una nueva base de datos para el reconocimiento de señales de tráfico del Ecuador, en los casos Pare y Ceda el Paso. Esta información está disponible para el libre uso de la comunidad científica en https://gitlab.com/mjflores/Ecuadorian_Traffic_Sign_Stop_and_Yield. De igual forma, hemos presentado el desarrollo de un nuevo método de segmentación por color para la generación de ROIs utilizando el clasificador $k - NN$ junto con el algoritmo de agrupamiento $K_m - means$. Esta implementación cubre eficientemente los escenarios de iluminación normal, soleado y oscuro, durante el día. Se incluye la distancia como un parámetro de referencia para la preselección de ROIs, en el rango de 5 a 20 metros de distancia. Así, esta propuesta alcanza una tasa de clasificación del 98,7% en la discriminación entre los píxeles de interés y el fondo. También hemos implementado una nueva versión del descriptor HOG que consiste en celdas de 8×8 píxeles, bloques de 2×2 celdas con solapamiento simple y orientaciones sin signo. La tasa de clasificación es del 99,49% usando SVM con núcleo polinómico.

Dos aspectos clave de este trabajo son la construcción de un sistema de detección de las señales de tráfico del Ecuador, especializado en los casos Pare y Ceda el Paso. La curva DET indica que su desempeño es del 96%, de manera que es competitivo respecto a las propuestas presentes en el estado del arte. La construcción de un asistente de ayuda a la conducción que trabaja en tiempo cuasi-real, es decir, a 21.58 fotogramas por segundo, de fácil instalación en un vehículo de uso cotidiano.

A futuro se extenderá esta metodología a los siguientes casos:

- Manejo de oclusiones para detectar señales parcialmente visibles bajo las distintas condiciones de iluminación.
- Para la detección de las señales de límites de velocidad del Ecuador.

AGRADECIMIENTOS

Los equipos utilizados en para el desarrollo de este proyecto han sido financiados por la empresa Tecnologías I&H. Además, agradecemos a los revisores anónimos por su valioso aporte ya que han contribuido significativamente en la mejora de este manuscrito.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

El diseño de la investigación, el desarrollo y la implementación del software, la supervisión y el análisis de los resultados experimentales corresponden a M. Flores. La implementación del software y el desarrollo de los experimentos pertenecen a C. Conlago y J. Yunda. La redacción y revisión del manuscrito y contrastación de la información recaen en M. Aldas y C. Flores.

REFERENCIAS

- [1] World Economic Forum. (2016). Global competitiveness report 2015-2016. *Competitiveness rankings. A. transport infrastructure*. Recuperado de <http://reports.weforum.org/global-competitiveness-report-2015-2016/competitiveness-rankings/#indicatorId=GCI.A.02.01>
- [2] Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador. (2015) Siniestros octubre 2015. Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador. Recuperado de <http://www.ant.gob.ec/index.php/descargable/file/3265-siniestros-octubre-2015>
- [3] Nguyen, B. T., Ryong, S. J., and Kyu, K. J. (2014). Fast traffic sign detection under challenging conditions. *Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 2014 International Conference, IEEE, 749-752*.
- [4] Shaout, A., Colella, D., and Awad, S. (2011). Advanced driver assistance systems-past, present and future. *Computer Engineering Conference (ICENCO), 2011 Seventh International, IEEE, 72-82*.
- [5] Møgelmoose, A., Liu, D., and Trivedi, M. M. (2015). Detection of US traffic signs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 16(6), 3116-3125*. doi: <https://doi.org/10.1109/ITITS.2015.2433019>
- [6] Perez-Perez, S. E., Gonzalez-Reyna, S. E., Ledesma-Orozco, S. E., and Avina-Cervantes, J. G. (2013). Principal component analysis for speed limit Traffic Sign Recognition. *Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2013 IEEE International Autumn Meeting, IEEE, 1-5*.
- [7] Cortes, C., and Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning, 20(3), 273-297*. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1022627411411>
- [8] Duda, R. O., Hart, P. E., and Stork, D. G. (2001). *Pattern classification 2nd edition*. New York, United States of America: John Wiley & Sons.
- [9] Cristianini, N., and Shawe-Taylor, J. (2000). *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge university press.
- [10] Salti, S., Petrelli, A., Tombari, F., Fioraio, N., and Di Stefano, L. (2015). Traffic sign detection via interest region extraction. *Pattern Recognition, 48(4), 1039-1049*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.05.017>
- [11] Li, H., Sun, F., Liu, L., and Wang, L. (2015). A novel traffic sign detection method via color segmentation and robust shape matching. *Neurocomputing, 169, 77-88*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.12.111>
- [12] Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2009). Unsupervised learning. In *The elements of statistical learning*. New York, United States of America: Springer.
- [13] Lillo-Castellano, J. M., Mora-Jiménez, I., Figuera-Pozuelo, C., and Rojo-Álvarez, J. L. (2015). Traffic sign segmentation and classification using statistical learning methods. *Neurocomputing, 153, 286-299*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.11.026>
- [14] Chen, T., and Lu, S. (2016). Accurate and Efficient Traffic Sign Detection Using Discriminative AdaBoost and Support Vector Regression. *IEEE Trans. Vehicular Technology, 65(6), 4006-4015*. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7328325>
- [15] Han, Y., Virupakshappa, K., and Oruklu, E. (2015). Robust traffic sign recognition with feature extraction and k-NN classification methods. *Electro/Information Technology (EIT), 2015 IEEE International Conference, IEEE, 484-488*.
- [16] Huang, Z., Yu, Y., and Gu, J. (2014). A novel method for traffic sign recognition based on extreme learning machine. *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress, IEEE, 1451-1456*.
- [17] Dalal, N. (2006). *Finding people in images and videos* (Doctoral dissertation). Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble.
- [18] Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2008). Speeded-up robust features (SURF). *Computer vision and image understanding, 110(3), 346-359*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>
- [19] Lau, M. M., Lim, K. H., and Gopalai, A. A. (2015). Malaysia traffic sign recognition with convolutional neural network. *2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP), IEEE, 1006-1010*.
- [20] Zhu, Y., Zhang, C., Zhou, D., Wang, X., Bai, X., and Liu, W. (2016). Traffic sign detection and recognition using fully convolutional network guided proposals. *Neurocomputing, 214, 758-766*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.07.009>

- [21] Caliński, T., and Harabasz, J. (1974). A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics-theory and Methods*, 3(1), 1-27. doi: <https://doi.org/10.1080/03610926.2011.560741>
- [22] Davies, D. L., and Bouldin, D. W. (1979). A cluster separation measure. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (2), 224-227. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/4766909>
- [23] Tibshirani, R., Walther, G., and Hastie, T. (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 63(2), 411-42. Recuperado de <http://web.stanford.edu/~hastie/Papers/gap.pdf>
- [24] Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of computational and applied mathematics*, 20, 53-65. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
- [25] Fawcett, T. (2004). ROC graphs: Notes and practical considerations for researchers. *ReCALL*, 31, 1-38.
- [26] Pajares Martinsanz, G., García, C., and Jesús, M. (2002). *Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones*. México: Alfaomega.
- [27] Dalal, N., and Triggs, B. (2005). Histograms of oriented gradients for human detection. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference, IEEE*, 886-893
- [28] Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *Ijcai*, 14(2), 1137-1145. Recuperado de <http://ai.stanford.edu/~ronnyk/accEst.pdf>
- [29] Martin, A., Doddington, G., Kamm, T., Ordowski, M., and Przybocki, M. (1997). *The DET curve in assessment of detection task performance*. United States of America: National Inst of Standards and Technology Gaithersburg MD. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/ae28/6f0d7fe2555ed16f405c59ac81eb94a9aec2.pdf>
- [30] Gómez-Moreno, H., Maldonado-Bascón, S., Gil-Jiménez, P., and Lafuente-Arroyo, S. (2010). Goal evaluation of segmentation algorithms for traffic sign recognition. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4), 917-930. Recuperado de <http://agamenon.tsc.uah.es/Investigacion/gram/publications/its10-gomez.pdf>
- [31] Zuo, Z., Yu, K., Zhou, Q., Wang, X., and Li, T. (2017). Traffic signs detection based on faster R-CNN. *Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW), 2017 IEEE 37th International Conference, IEEE*, 286-288.
- [32] Mobileye. (2018). ADAS. *Mobileye*. Recuperado de <https://www.mobileye.com/our-technology/adas/>
- [33] Continental-automotive.com. (2018). Advance Driver Assistance System. *Continental Automotive*. Recuperado de <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Chassis-Safety/Advanced-Driver-Assistance-Systems/Driving-Functions/Traffic-Sign-Assist>
- [34] Shi, J. H., and Lin, H. Y. (2017). A vision system for traffic sign detection and recognition. *Industrial Electronics (ISIE), 2017 IEEE 26th International Symposium, IEEE*, 1596-1601.

Proceso editorial

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías recibe manuscritos que presentan información original y la evaluación de los manuscritos se realiza a través de un proceso de revisión por pares (peer-reviewed) que toma en consideración una determinación objetiva de la robustez científica y metodológica, no en factores subjetivos como “impacto” o “interés”.

Revisar los criterios de publicación de la revista y nuestras políticas del proceso de evaluación por pares en el siguiente enlace: <http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about/editorialPolicies>

Para la organización de los artículos y comunicaciones, la revista se divide internamente en tres secciones:

Sección A: Ciencias Exactas y Físicas

Sección B: Ciencias Biológicas y Ambientales

Sección C: Ingenierías.

ACI Avances en Ciencias e Ingenierías se adhiere a los lineamientos de autoría de la ICMJE. Revisa más detalles sobre los requisitos de autoría en el siguiente enlace: <http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about/editorialPolicies>

DIRECTRICES PARA AUTORES/AS

Por favor, revise estas directrices para preparar su manuscrito, pues todos los manuscritos enviados a la revista **ACI Avances en Ciencias e Ingenierías** deben cumplirlas. Estas directrices le ayudarán a estar seguro que su manuscrito está completo y que el proceso editorial se conducirá lo más ágil posible. Asegúrese de revisar el Enfoque y Alcance de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías así como nuestros Criterios de Publicación, nuestras Políticas Editoriales, incluyendo las Políticas de Sección, Proceso de Evaluación por Pares, Frecuencia de Publicación, Política de Acceso Abierto, y Requisitos de Autoría en el siguiente enlace: <http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/about>

La revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías publica contribuciones en español e inglés, todas son sujetas a un proceso de revisión por pares, y se pueden enmarcar en una de las siguientes categorías:

Artículo: Un manuscrito que reporta conclusiones substanciales para el entendimiento de un problema, debiendo ser actualizado y exhaustivo en sus análisis y conclusiones, e incluir el conjunto completo de datos empíricos que soportan las ideas expuestas (se incluyen revisiones sistemáticas de la literatura y meta-análisis). Estos manuscritos usualmente tienen más de 2000 palabras y no hay límite máximo de palabras, figuras o tablas. Estos manuscritos deben tener divisiones con subtítulos (ver sección Organización del manuscrito).

Comunicación: Corresponde a un reporte conciso de un tema de investigación específico destinado a la presentación rápida de resultados novedosos pero de interés puntual. El tipo de información reportada es flexible, y puede incluir manuscritos que prueban nuevas metodologías, que describen observaciones de historia natural, o que presentan datos empíricos puntuales y novedosos. Estos manuscritos usualmente tienen menos de 2000 palabras y pueden incluir máximo tres tablas y tres figuras. El texto de estos manuscritos no tiene divisiones (ver sección Organización del manuscrito).

Ciertos manuscritos podrían ser reclasificados entre Artículos y Comunicaciones a discreción de los Editores de la revista y con el permiso del autor.

Revisión de Libro: Corresponde a una crítica objetiva que analiza el contenido y estilo de un libro recientemente publicado y de relevancia dentro del enfoque de la revista. Cada revisión resume, evalúa y discute el contenido del libro a la luz de las necesidades actuales de la comunidad científica. No se incluyen datos originales o sin publicar. Las revisiones son solicitadas por invitación de los Editores de la revista y tienen máximo 1500 palabras. Si está interesado en realizar una revisión o en sugerir un libro para revisión, por favor póngase en contacto con la revista: avances@usfq.edu.ec

Números especiales: La revista publicará números especiales sobre un tema específico o en honor a un académico (Festschrift). Cada número especial será coordinado por un Editor Invitado, quien trabajará junto a los Editores de la revista. Personas interesadas en liderar un número especial deben enviar su propuesta al Editor en Jefe de la revista. Todos los manuscritos aprobados del número especial serán publicados en versión digital y, dependiendo de la cantidad se imprimirán como parte del siguiente número de la revista o como un número impreso por separado.

PREPARACIÓN DEL MANUSCRITO

Formato de archivo. Para el envío inicial, los manuscritos pueden estar en cualquiera de los siguientes formatos: DOC, DOCX., RTF, o PDF.

Si utiliza Mendeley para sus referencias, debe transformar los campos de Mendeley en texto simple.

Se recomienda que los manuscritos que contengan ecuaciones sean producidos en LaTeX. Manuscritos producidos en LaTeX

deben ser enviados en formato PDF (si el manuscrito es aceptado, se le solicitará el archivo *.TEX).

Tipo de letra. Times de 12 puntos

Los encabezados deben ir en mayúsculas y centrados (aquellos descritos en la sección Organización del manuscrito).

En caso de incluir subtítulos adicionales a los encabezados, se los colocará en negrillas y con estilo de oración (primera letra en mayúscula y el resto en minúsculas).

El resto del texto no debe tener ningún tipo de formato adicional, excepto colocar palabras en negrillas y en cursiva. No usar tabulaciones, diferentes tamaños de letra, numeración o estilos para subtítulos, etc.

Diseño de página. Alineación a la izquierda (no justificado), textos a espacio seguido, hojas tamaño A4, márgenes de 2,5 cm a cada lado.

Encabezados. Los encabezados principales se especifican en la sección Organización del manuscrito. Adicionalmente puede haber hasta dos niveles más de subtítulos.

Números de página. Todas las páginas deben estar numeradas de manera secuencial en la esquina inferior derecha.

Notas al pie. No se debe colocar notas al pie, pues toda la información debe estar en el texto principal o en las referencias.

Abreviaciones. Defina las abreviaciones en la primera vez que las usa en el texto (incl. acrónimos, acortamientos, abreviaturas, y siglas).

Mantenga al mínimo el número de abreviaciones. No utilice abreviaciones no estandarizadas al menos que las utilice más de tres veces en el texto.

Formato de referencias. Siga el estilo APA (6a edición). Revise las directrices para citas y referencias.

Ecuaciones. Manuscritos que contengan ecuaciones se recomienda sean producidos con LaTeX.

Utilizar MathType para generar y desplegar ecuaciones, caso contrario también es adecuado Equation Editor.

Numere las ecuaciones al lado derecho entre paréntesis. Por ejemplo: $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$ (1)

No utilice MathType o Equation Editor para colocar signos de variables, símbolos griegos, u operadores matemáticos en el texto general del manuscrito. En estos casos, inserte los símbolos como texto normal con los valores Unicode (hex) correctos.

Lenguaje. Escriba el texto y las leyendas de tablas y figuras de manera clara y sin ambigüedades, enfocado en una audiencia internacional. Siga las normas de escritura académica establecidas en el campo al cual corresponde el manuscrito.

Manuscritos en Inglés pueden usar Inglés Americano o Inglés Británico pero de manera consistente.

Manuscritos en Español deben seguir las recomendaciones de la Real Academia de la Lengua Española (con excepción del uso de tilde en “et al.”).

Medidas, fechas y hora. Use el Sistema Internacional de Unidades. Puede usar unidades específicas a la disciplina que no son SI solo cuando estas han sido ampliamente adoptadas en dicho campo científico. Coloque un espacio entre el número y el símbolo de la unidad, no coloque un punto al final del símbolo de la unidad, ejemplo: 4 km

Las fechas deben indicarse como Día Mes Año. No abrevie el mes. Ejemplo: 12 de febrero 2015, 14 January 2013

La hora debe seguir el formato de 24 horas, ejemplo: 13h00

Numeración y porcentajes. Escribir los números del 1 al 9 en palabras, a menos que sean unidades.

No incluya un espacio entre el valor y el símbolo de porcentaje, ejemplo: 45%

Coordenadas geográficas. Expresé las coordenadas geográficas en grados decimales. No reporte coordenadas en grados-minutos-segundos o en UTM. Incluya el sistema de referencia geodésico.

Use N/S para denotar latitud y E/W para denotar longitud, independiente el idioma del manuscrito.

Nomenclatura

Nombres científicos de especies se escriben en cursiva. Escriba el género y la especie de manera completa en el título del manuscrito y la primera vez que mencione al organismo en el texto, abstract, resumen, y leyendas de tablas y figuras. Así mismo, escriba el género completo cada vez que lo mencione por primera ocasión en un párrafo o cuando inicie una oración. Luego de la primera mención en el párrafo se puede abreviar género utilizando sólo la primera letra.

Genes, mutaciones, genotipos o alelos se escriben en cursiva. Utilice el nombre recomendado consultando la base de datos apropiada de nomenclatura genética. Usualmente es recomendable indicar los sinónimos para el gen la primera vez que aparece en el texto. Los prefijos de genes tales como los usados para oncogenes o la localización celular deben mostrarse en caracteres de tipo romano (e.g., v-fes, c-MYC).

Compuestos químicos deben tener un nombre sistemático correcto, siguiendo los convenios de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). Una vez que se ha proporcionado el nombre sistemático, es aceptable definir un nombre común o un acrónimo y para esto ser utilizado para el resto del texto, tablas y figuras. Los nombres generados por ChemDraw u otro software a partir de fórmulas gráficas introducidas deben ser verificados para guiones adicionales y otras desviaciones de las convenciones de la IUPAC. Los nombres sistemáticos o genéricos deben usarse para productos comerciales en lugar de nombres patentados o de marca registrada.

Sustancias farmacéuticas deben mencionarse bajo la Denominación Común Internacional (DCI, o INN International Nonproprietary Name)

Evidencia en estudios biológicos. Si su manuscrito utiliza datos de organismos biológicos, se debe declarar explícitamente la disponibilidad de la evidencia bajo una de las siguientes opciones:

Especímenes voucher depositados en colecciones científicas abiertas al público (es necesario indicar el nombre de la colección y los números de catálogo de los especímenes).

Secuencias de aminoácidos o genes depositadas en GenBank o un repositorio equivalente (indicando el nombre del repositorio y los códigos de acceso).

Fotografías, grabaciones de audio o vídeo enviadas como parte de las figuras o como material suplementario del manuscrito. Fotografías, grabaciones de audio o vídeo que han sido depositadas en un repositorio institucional o público (por ejemplo, Macaulay Library, o xeno-canto), para las cuales es necesario indicar el nombre del repositorio y citar el registro usando el formato de citación APA para recursos electrónicos e incluirlo en la sección de Referencias.

La colección de datos de organismos biológicos debe realizarse de acuerdo a la legislación nacional e internacional vigente. Es imprescindible que los permisos de investigación y colección otorgados por las autoridades competentes se indiquen en la sección de Agradecimientos del manuscrito.

Datos y códigos. Si su manuscrito se basa en análisis de datos sin procesar (raw data) o códigos, estos deben estar a disposición de los revisores. Por favor, envíelos por una de las siguientes vías:

- Como enlaces a un repositorio donde los datos son accesibles y citados en el manuscrito. Este repositorio puede ser institucional, comercial o de acceso abierto (por ejemplo, figshare o Dryad)
- Como archivos de Material Suplementario.

Si el manuscrito es aceptado, los datos deberán hacerse públicos de tal forma que los datos estén disponibles públicamente para todos los investigadores interesados.

Sin embargo, entendemos que pueden haber restricciones éticas y legales que prohíban la apertura de los datos, por lo que cuando exista legislación o marcos éticos locales que llamen a evitar o limitar la liberación de datos, los autores deben dejar estas limitaciones claras al momento del envío de su manuscrito (en la sección de Comentarios para el editor/a).

Posibles excepciones a la disponibilidad de datos públicos incluyen: datos que no pueden ponerse a disposición del público pues comprometería la confidencialidad o la privacidad del participante; o datos que de ponerse a disposición pública podrían presentar alguna amenaza, como revelar las ubicaciones de depósitos fósiles, especies en peligro de extinción, etc.

Si los datos sin procesar o los códigos pertenecen a terceros y Ud. no tiene permiso para publicarlos, debe presentar la fuente y la verificación del permiso de uso de los datos así como la Información de contacto donde un investigador interesado tendría que aplicar para obtener acceso a los datos pertinentes, en la sección Materiales y Métodos. Sin embargo, tenga en cuenta que los autores son responsables de asegurarse de que los datos estarán disponibles a partir de la publicación, de la misma manera que los autores obtuvieron los datos.

ORGANIZACIÓN DEL MANUSCRITO

1. La primera página del manuscrito debe incluir las siguientes partes, cada una separada por una línea:

- **Título del artículo:** En negrillas, con máximo 300 caracteres, debe ser específico, descriptivo, conciso y comprensible para los lectores fuera del campo. Sólo la primera palabra y los nombres propios empiezan con mayúsculas. Puede dividirse en título y subtítulo, separados por el signo de puntuación dos puntos (:). Para revisiones sistemáticas o meta-análisis, el subtítulo debe incluir el diseño del estudio.
- **Título abreviado:** En negrillas, con máximo 100 caracteres, describe el tópico de estudio. Sólo la primera palabra y los nombres propios empiezan con mayúsculas.
- **Nombres de los Autores:** Presente los nombres de los autores tanto en la primera página del manuscrito como en la plataforma de la revista. Para cada autor debe incluir el primer nombre, el segundo nombre (o su inicial, si la usa) y los apellidos. Los autores se separan entre sí por comas (no colocar y, and, &).
- **Afiliaciones:** Cada autor de la lista debe tener una afiliación. La afiliación debe incluir al menos el nombre de la organización o universidad y su ubicación. Las afiliaciones se asociarán con los autores por medio de superíndices numéricos. Múltiples afiliaciones por autor se separarán en líneas diferentes y con superíndices propios. Se marcará al autor responsable del manuscrito con un asterisco junto a los superíndices, asociado con la frase "Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail:" seguido por el correo electrónico. Si todos los autores comparten la misma afiliación o si hay un solo autor no usar superíndices numéricos. Si hay un solo autor, no incluir la frase "Autor Principal / Corresponding Author"

Todos los autores deben cumplir con los requerimientos de autoría establecidos de la política de **Requisitos de Autoría** de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías. Aquellos que hayan contribuido al trabajo pero que no cumplan estos requisitos puede ser mencionados en los Agradecimientos.

El Autor para correspondencia debe ingresar su identificador único ORCID al momento del envío del manuscrito (óptimamente, todos los doctores del manuscrito deberían contar su propio ORCID). +Info sobre ORCID.

Los nombres de los autores se publicarán exactamente como aparecen en el manuscrito. Por favor revise la información con cuidado para asegurarse de que es correcta.

- **Título en idioma alternativo:** Si su manuscrito es en Español, el título alternativo es la traducción en Inglés, y viceversa.
- **Abstract:** En Inglés, redactado como un párrafo continuo de máximo 400 palabras. Detalla brevemente los principales objetivos del estudio; explica cómo se realizó el estudio, incluyendo cualquier organismo modelo utilizado, pero sin entrar en detalles metodológicos; resume los resultados más importantes y su significado. No debe incluir citas bibliográficas ni abreviaciones y no debe estar separado en párrafos.
- **Key words:** Máximo 10 palabras o grupos de palabras en Inglés. Deben ser diferentes a lo que aparece en el título del manuscrito.
- **Resumen:** Es la traducción al Español del Abstract, y tiene sus mismas características.
- **Palabras clave:** Máximo 10 palabras o grupos de palabras en Español. Deben ser diferentes a lo que aparece en el título del manuscrito.
- Se puede incluir un tercer resumen en Portugués, Francés, Italiano, Alemán u otra lengua, si lo considera necesario.

2. Desde la siguiente página se presentarán el texto organizado por encabezados, luego las tablas y las figuras del manuscrito. La organización dependerá del tipo de contribución. Se sugiere usar una organización según el método científico, por ejemplo:

Organización de un manuscrito sometido como Artículo	Organización de un manuscrito sometido como Comunicación
Introducción	Texto (sin divisiones)
Materiales y métodos	Agradecimientos
Resultados	Referencias
Discusión	Contribuciones de los autores
Agradecimientos	Tablas
Referencias	Figuras
Contribuciones de los autores	
Tablas	
Figuras	

Otras secciones pueden ser: revisión de literatura, conclusiones, recomendaciones. La estructura del artículo será revisado por y evaluado el/los editor(es) y los revisores.

3. En los **Agradecimientos** se incluye:

- Declaración explícita de las fuentes de financiamiento que permitieron el desarrollo del trabajo.
- Los detalles de los permisos o autorizaciones para el desarrollo de la investigación y las instituciones que los emitieron.
- Aquellos que hayan contribuido al trabajo pero que no cumplan con los requisitos de autoría pueden ser mencionados en los Agradecimientos con una descripción de sus contribuciones.
- Los autores son responsables de asegurarse que toda persona nombrada en los agradecimientos está de acuerdo con eso.

4. La sección de **Contribuciones de los Autores** es necesaria cuando hay más de un autor. Se debe describir la contribución de cada uno de los autores para el desarrollo del artículo de manera explícita pero sucinta. La contribución puede ser:

- concepción de la investigación;
- diseño de la metodología;
- curación de datos para la investigación;
- administración del proyecto;
- adquisición, análisis o interpretación de los datos, incluyendo las labores de campo, laboratorio, experimentales, estadísticas, o el soporte técnico;
- adquisición de fondos;
- provisión de recursos, incl. equipos, materiales, reactivos, entre otros;
- desarrollo de software;
- supervisión o tutoría;
- validación y verificación de los resultados;
- redacción del manuscrito;
- revisión crítica del contenido intelectual del manuscrito;
- producción de tablas, figuras o material complementario.

Ejemplo:

María Álvarez y Pedro Pérez concibieron la investigación; Juan Norton y María Álvarez desarrollaron la metodología y realizaron el trabajo de campo; Juan Norton, Jonathan Castro y Pedro Pérez diseñaron el modelo y corrieron los análisis; Jonathan Castro y María Álvarez realizaron los análisis moleculares; Pedro Pérez proveyó reactivos; Juan Norton y Jonathan Castro redactaron el manuscrito; Juan Norton, Jonathan Castro, Pedro Pérez, María Álvarez y Pedro Pérez revisaron críticamente el contenido intelectual del manuscrito; Juan Norton tomó las fotografías de las figuras 1 y 3.

Recuerde que la autoría del manuscrito debe seguir los lineamientos de autoría de la ICMJE.

DIRECTRICES PARA REFERENCIAS

- En el texto, usar citas numeradas colocadas al final de la oración entre corchetes. Los números de citas diferentes deben separarse por comas, a menos que sea un rango continuo de citas en cuyo caso se usará un guion. Ejemplos: [10] [10,15,22] [12–20].
- Numerar las citas secuencialmente según aparecen en el texto (NO en orden alfabético de las referencias).
- Citar los trabajos sin publicar, en preparación o en proceso de revisión como “(datos sin publicar)”, precedido por las iniciales y apellido del autor. Por ejemplo: A. Suárez (datos sin publicar)
- Se debe evitar las citas de información proveniente de correos electrónicos, cartas o documentos enviados entre colaboradores, pero si es absolutamente necesario, se deben referir como “com. pers.” cuando corresponden a comentarios sin respaldo de correspondencia, y como “in litt.” cuando hubo correspondencia escrita. En ambos casos, precedidos por las iniciales y apellido del colaborador y seguida del año. Por ejemplo: (J. Muñoz in litt. 2009) (J. Muñoz com. pers. 2010)
- Subtitular la lista de referencias como Referencias (no Bibliografía o Literatura Citada).
- Ordenar la lista de Referencias de acuerdo al orden secuencial que aparecen en el texto del manuscrito (NO en orden alfabético).
- El formato de las referencias debe seguir el estilo APA (6a Edición). Este estilo arma cada referencia con los siguientes componentes generales:
- Autores. (Año). Título de la obra. Datos de publicación.
- Ejemplos:

Artículo en revista impresa:

Andersson, L. G. (1945). Batrachians from East Ecuador, collected 1937, 1938 by Wm. Clarke-Macintyre and Rolf Blomberg. *Arkiv för Zoologi (Stockholm)*, 37A(2), 1–88.

Artículo en revista con URL:

Ahlman, R. (2016). Green-winged Teal *Anas crecca carolinensis*, first record for Ecuador. *Cotinga*, 38, 40. Recuperado de <http://www.neotropicalbirdclub.org/wpcontent/downloads/C38online/Ahlman.pdf>

Artículo en revista con DOI:

Jacobsen, D., Schultz, R., & Encalada, A. (1997). Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biology*, 38(2), 247–261. doi: <http://www.dx.doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00210.x>

Libro impreso:

Diamond, J. (2006). *The Third Chimpanzee: The evolution and future of the human animal*. New York: Harper Perennial.

Libro con URL:

Suber, P. (2102). *Open Access. The MIT Press Essential Knowledge Series*. Cambridge: The MIT Press. Recuperado de <http://bit.ly/oa-book>

Libro con editores con DOI:

Walsh, S. J., & Mena, C. F. (Eds.). (2012). *Science and conservation in the Galapagos Islands: frameworks & perspectives*. Vol. 1. New York: Springer Science & Business Media. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-5794-7>

Capítulo de un libro impreso:

Minogue, K. (2014). Does the idea of “self-interest” explain the character of modern free societies? En P. Lucio Paredes & S. Oleas (Eds.), *The Complexity of Liberty: Selected essays from the Mont Pelerin Society Special Meeting in Galápagos June 2013*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.

Capítulo de un libro con DOI:

Maldonado, M., Maldonado-Ocampo, J. A., Ortega, H., Encalada, A. C., Carvajal-Vallejos, F. M., Rivadeneira, J. F., Acosta, F., Jacobsen, D., Crespo, A. & Rivera-Rondón, C. A. (2011). Biodiversity in aquatic systems of the Tropical Andes. En S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jorgensen, & H. Tiessen (Eds.), *Climate change and biodiversity in the tropical Andes* (pp. 276–294). Paris/São José dos Campos: Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee

on Problems of the Environment (SCOPE). Recuperado de <http://www.iai.int/wp-content/uploads/2014/06/book.pdf>

Disertación:

Brandt, M. (2003). Influencia del erizo lapicero (*Eucidaris thouarsii*) en la estructura de la comunidad submarina de la cara norte del Isote Caamaño, Galápagos (Tesis de Licenciatura). Universidad San Francisco de Quito USFQ, Quito.

Enciclopedia en línea (cita global de toda la enciclopedia):

Frost, D. R. (2016). Amphibian Species of the World: an Online Reference (Version 6.0). American Museum of Natural History. Recuperado el 5 de febrero de 2017 de <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>

Ficha en enciclopedia en línea con URL:

Frost, D. R. (2016) *Nymphargus buenaventura* (Cisneros-Heredia and Yáñez-Muñoz, 2007). En Amphibian Species of the World: an Online Reference (Version 6.0). American Museum of Natural History. Recuperado el 5 de febrero de 2017 de <https://web.archive.org/web/20170206001235/http://research.amnh.org/vz/herpetology/amphibia/Amphibia/Anura/Centrolenidae/Centroleninae/Nymphargus/Nymphargus-buenaventura>

Noticia en periódico en línea:

En el limbo futuro de telescopio en Arecibo (2017, enero 30). El Universo. Recuperado de <https://web.archive.org/web/20170206002227/http://www.eluniverso.com/vida-estilo/2017/01/30/nota/6023449/limbo-futuro-telescopio-arecibo>

- Separar cada autor con una coma, y colocar "&" antes del último autor. Las iniciales de los nombres de los autores van después de los apellidos. Indicar todos los autores y no usar et al.
- Incluir el número de la revista entre paréntesis luego del volumen, si está disponible.
- Separar el rango de páginas por un guion n (-). No confundir esto con un guion simple (-).
- Colocar el DOI (Digital Object Identifier) en todas las referencias que lo tengan disponible, precedido por "doi:". El DOI debe estar en formato de enlace largo: <http://doi.org/xxx.xxx.xxx>
- No colocar un punto después del DOI.
- Si un DOI no está disponible (debe hacer una búsqueda exhaustiva), colocar un enlace estable hacia el sitio web de la revista (por ejemplo, el enlace estable de JSTOR) o un repositorio institucional (por ejemplo, Archive.org), con el texto "Recuperado de". No colocar enlaces a páginas web personales, servicios no-permanentes de carga/descarga de archivos.
- Para incluir la dirección de Internet o URL de una página que podría cambiar en el futuro debe primero respaldar dicho URL en un archivo digital que resguarden dicha referencia para el futuro. Para esto puede usar Wayback Machine de Internet Archive <https://archive.org/web/> o el sistema archive.is <http://archive.is>. Esto debe ser hecho en particular para páginas que provienen de enciclopedias en línea, periódico de noticias, páginas personales o institucionales.
- Cuando se hace referencia a publicaciones en línea que tienen fechas específicas (como los blogs), se debe colocar (Año, Mes día) y no solo el año.
- Colocar Anónimo cuando no exista un autor determinado.
- Colocar n/f cuando no se conozca el año de publicación.
- Citar manuscritos aceptados para publicación como "in press" solamente si ya tiene la información de publicación del artículo (número de la revista y páginas). Artículos que no tengan esta información son considerados aceptados, pero no en prensa y serán citados como "datos en proceso de publicación" dentro del texto, pero no se incluirán en las Referencias Bibliográficas.
- No se aceptará literatura gris entre las referencias bibliográficas. La literatura gris corresponde a documentos que no están disponibles por canales bibliográficos regulares (como bibliotecas o bases de datos en línea), y usualmente corresponde a reportes técnicos, informes y otros trabajos sin publicar. De ser en extremo necesario, su uso será autorizado por el Editor del manuscrito. Sin embargo, es preferible considerar la opción de colocar esa información como "datos sin publicar" o "comunicación personal". De ser aprobada su inclusión como referencia, una copia del documento de literatura gris debe ser depositada en la Biblioteca de la USFQ.

DIRECTRICES PARA TABLAS

- Citar tablas en el texto con numerales arábigos en el orden que aparecen. Ejemplos: "Tabla 1" "Tablas 1–3"
- Colocar las tablas luego del texto, cada una iniciará en su propia página.
- Las tablas deben alcanzar en una hoja A4 con márgenes de 2,5 cm, pudiendo esta orientarse de manera vertical y horizontal, según sea mejor para la apariencia de la tabla.
- Cada tabla debe tener su propia leyenda explicativa, la cual debe ser comprensible sin hacer referencia al texto y será colocada antes de la tabla. Cada leyenda empezará con el número de la tabla. Ejemplo:

TABLA 1. Comparación de los efectos...

- Incluir unidades en los encabezados de columnas y filas entre paréntesis.
- De ser necesarias, colocar notas al pie de la tabla enlazadas con los siguientes símbolos en el mismo orden: *, †, ‡, §, ¶. Sin embargo, es preferible colocar cualquier aspecto importante como parte de la leyenda.

DIRECTRICES PARA FIGURAS

- Avances en Ciencias e Ingenierías publica sin costo figuras a color, siempre y cuando se relacionen directamente con el manuscrito.
- El término Figura hace referencia a todo tipo de imágenes, incluyendo gráficos, dibujos, fotografías y mapas.
- Citar figuras en el texto con numerales arábigos en el orden que aparecen usando la abreviatura “Fig”. Ejemplo: “Figs. 1–3”
- En el envío inicial, las figuras deben ir en baja resolución, siempre que sean legibles, e incluidas en el archivo de texto del manuscrito, luego de las tablas. Sin embargo, una vez aceptado el manuscrito, las figuras deben ser enviadas en resolución alta (mínimo 300 dpi, recomendable 600 dpi) en uno de los siguientes formatos: *.tiff, *.eps, *.emf, *.bmp, como documentos separados del archivo de texto.
- Cada figura irá en su propia página y precedida por su leyenda. La leyenda será autoexplicativa, debiendo ser comprensible sin hacer referencia al texto y será colocada antes de la figura. Cada leyenda empezará con el número de la figura. Ejemplo:
FIGURA 1. Mapa de la región...
- Figuras dibujadas con líneas (line artwork) se preparan mejor en programas gráficos basados en vectores (e.g. Corel Draw, Illustrator, Freehand, Inkscape, ArcView). Por lo que es recomendable presentarlas en formato EPS. No use líneas de un ancho menor a 0.3 puntos.
- Las fotografías en blanco y negro, fotografías a color y mapas y gráficos realizados en programas basados en raster (e.g. Photoshop, Gimp) es recomendable que sean enviadas en formato *.tiff. Para archivos *.tiff, note que la resolución es irrelevante, es importante el tamaño en pixeles, por lo que recomendamos un tamaño mínimo de 1000 pixeles.
- Todo manuscrito que incluya un sitio de estudio debe incluir un mapa del mismo. Dicha figura debe: (1) ir rodeada de un borde con líneas delgadas, (2) estar geográficamente referenciado con algunas marcas de latitud y longitud y con un pequeño mapa insertado que indique la localización general, (3) tener una barra de escala en km. (4) tener una flecha que indique el Norte (no usar una rosa de los vientos), y (5) tener líneas de referencia como límites de países, carreteras, ríos o elevaciones, extendiéndose hasta el borde.
- Para todas las figuras use líneas con un grosor entre 0.3–1.0 puntos y tamaños de letra de 12 puntos.
- Todas las letras y textos usados dentro de las figuras deben ir en Times.
- Si es que desea agregar varias imágenes como una sola figura compuesta o crear una lámina con varias imágenes que ocupe toda una página, no se preocupe por el diseño de la misma. En el primer envío del manuscrito no debe armar dicha figura, sino que debe colocar la leyenda de la figura y luego pegar cada imagen separada. Cada imagen debe tener su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen. Cuando el manuscrito avance en el proceso de publicación, el equipo de diseño de la revista se ocupará de armar y diseñar sus imágenes compuestas o láminas.
- Recuerde que las figuras serán ajustadas al tamaño de una o dos columnas en una página A4, por lo que todos los elementos de la imagen deben ser lo suficientemente grandes para ser legibles después de la reducción de tamaño, en especial los textos internos y las líneas.
- Eliminar espacios blancos o vacíos innecesarios alrededor de las figuras.
- Incluir los créditos respectivos de la figura en la leyenda. Recuerde que es responsabilidad del autor tener los permisos necesarios para poder reproducir la figura bajo la Licencia Creative Commons de la revista.
- Si usa un mapa como una figura, debe citar la fuente del mapa. De ser posible, use mapas que sean de uso público o que permitan su uso irrestricto. Si usa Google Earth o Google Maps, debe seguir los lineamientos de atribución de Google.

DIRECTRICES PARA MATERIAL SUPLEMENTARIO

- Los autores pueden publicar material suplementario junto a su manuscrito. Este material corresponde a información que complementa o provee soporte al manuscrito publicado y que se podrá descargar como archivos independientes.
- Diferentes tipos de información pueden ser incluidos como material suplementario: textos extensos sobre metodologías, bases de datos, archivos de video, de audio, fotográficos y otros respaldos audiovisuales, entre otros.
- Los Materiales Suplementarios reemplazan a los Apéndices.
- Estos materiales serán citados al final del manuscrito con enlaces al portal de la revista donde estarán a disposición del público de manera gratuita.
- Si el material suplementario está compuesto por texto, debe ser presentado con el mismo formato general requerido para el manuscrito.
- De ser necesario, citar archivos de Material Suplementario en el texto siguiente el siguiente formato: Fig. S1, Tabla S1, Datos S1, Videos S1, Artículo S1, Audio S1. Donde la S indica que es material suplementario, y el número indica la secuencia numérica de dicho material.

- Para maximizar compatibilidad, sugerimos que envíe su Material Suplementario en los siguientes formatos: Imágenes en JPG, EPS o PNG; tablas en XLS o XLSX; textos en PDF; vídeos en AVI, MOV o MP4, y archivos de audio en WAV o MP3.
- Sets grandes de datos suplementarios se pueden presentar en formato comprimido (zip o tar).

DIRECTRICES SOBRE NOMENCLATURA BIOLÓGICA Y DESCRIPCIÓN DE NUEVAS ESPECIES

- ACI Avances en Ciencias e Ingenierías cumple con los requisitos establecidos por los diferentes códigos de nomenclatura sobre la validez para la descripción de nuevas especies y la disponibilidad de los artículos en línea como trabajos publicados, incluyendo el International Code of Zoological Nomenclature y el International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants.
- La revista se encargará de obtener los registros y el GUID (LSID) en Zoobank, IPNI y Mycobank o Index Fungorum.
- Todos los artículos y comunicaciones de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías están siendo depositados en Internet Archive Archive.org y en el repositorio USFQ.
- Los autores deben adherirse a los lineamientos establecidos por los códigos internacionales de nomenclatura respectiva al organismo tratado.
- Las descripciones de especies nuevas de seres vivos o los análisis taxonómicos deben seguir lo establecido en el respectivo código de nomenclatura.
- Cuando un taxón biológico es mencionado por primera vez, se debe escribir su nombre común (como nombre propio) seguido por su nombre científico en cursiva, por ejemplo: Oso de Anteojos *Tremarctos ornatus*. No colocar el nombre científico o el nombre común entre paréntesis. Más adelante en el manuscrito se puede usar solamente el nombre científico o el nombre común.
- Si el manuscrito corresponde a un análisis taxonómico o si existe controversia en relación a la nomenclatura del organismo estudiado, presentar el nombre del taxón seguido por los datos de autoría taxonómica al mencionarlo por primera. Los datos de autoría taxonómica de nombres zoológicos son los apellidos de los descriptores y el año de descripción, separados por una coma, ejemplo: *Grallaria ridgelyi* Krabbe et al., 1999. La autoría taxonómica de nombres botánicos debe seguir lo especificado en The International Plant Names Index. Colocar la autoría taxonómica entre paréntesis solo si existió un cambio a nivel del género. Cuando hay tres o más descriptores utilizar “et al.” sin cursivas.

ENVÍO DEL MANUSCRITO

1. Todos los manuscritos sometidos a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías deben ser enviados a través de este portal. En la sección Envíos en Línea podrán registrarse y crear un Nuevo Envío.
2. Si manuscrito tiene más de un autor, por favor incluya la información de todos los autores en el sistema (incluyendo sus correos electrónicos).
3. Al momento de someter su manuscrito, debe indicar el nombre, institución y correo electrónico de por lo menos cuatro posibles revisores que podrían hacer la evaluación de pares académicos de su manuscrito. Estas personas deben ser capaces de proveer una evaluación objetiva de su manuscrito, por lo que no pueden pertenecer a la institución de ninguno de los autores, ni estar involucrados en el estudio de manera directa o indirecta. El equipo editorial de la revista se reserva el derecho de seleccionar a los revisores sugeridos al momento del envío del manuscrito o de buscar a otros revisores.
4. Para el envío inicial, el manuscrito debe consistir de un solo archivo que incluya: el texto, las tablas y figuras. Las tablas y las figuras deben ir luego del texto (no intercaladas en el texto). Cada tabla y figura irá en su propia página y estará precedida por su leyenda. En caso de enviar Material Suplementario, deberá ser enviado como archivos separados y subidos al momento del envío inicial.
5. Si es que algunas de las figuras de su manuscrito es una figura compuesta por varias imágenes, no debe armar dicha figura sino que debe colocar la leyenda de la figura y luego pegar cada imagen separada. Cada imagen debe tener su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. 5A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen.
6. La revista mantendrá comunicación directa con el autor para correspondencia, quien es el responsable de someter el manuscrito, recibir las revisiones, enviar el manuscrito revisado, aprobar la corrección de originales y las pruebas de imprenta.

Por favor, revise estas directrices para preparar su manuscrito, pues todos los manuscritos enviados a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías deben cumplirlas. Estas directrices le ayudarán a estar seguro que su manuscrito está completo y que el proceso editorial se conducirá lo más ágil posible.

Asegúrese de revisar el Enfoque y Alcance de ACI Avances en Ciencias e Ingenierías así como nuestros Criterios de Publicación para conocer lo que publicamos.

Lea nuestras Políticas Editoriales, incluyendo las Políticas de Sección, Proceso de Evaluación por Pares, Frecuencia de Publicación, Política de Acceso Abierto, y Requisitos de Autoría.

LISTA DE COMPROBACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE ENVÍOS

Como parte del proceso de envío, los autores/as están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores/as aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

- El estudio presenta los resultados de investigación científica primaria.
- El envío no ha sido publicado previamente ni se ha sometido a consideración en otra publicación.
NOTA: ACI Avances en Ciencias e Ingenierías apoya a los autores que desean compartir su trabajo de manera temprana a través de archivos/repositorios de prepublicaciones (preprint servers/repositorios), incluyendo arXiv, bioRxiv, figshare, PeerJ Preprints, SSRN, Zenodo, entre otros. De igual forma consideramos manuscritos que han salido únicamente como tesis en repositorios institucionales o trabajos que han sido presentados en actas de conferencias.
- Todas las metodologías de análisis, tanto experimentales, estadísticas y otras, se han realizado bajo estándares técnicos de alta calidad y se describen en suficiente detalle para garantizar su reproducibilidad.
- Todas las conclusiones se pasan en la interpretación justificada y apropiada de los resultados. Los autores deben evitar exagerar el alcance de sus conclusiones y si bien pueden discutir el posible impacto de sus resultados deben identificar sus ideas como hipótesis y no como conclusiones.
- Los textos están escritos de una manera entendible y clara, teniendo un correcto uso del lenguaje. Los manuscritos aceptados por la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías pasan por una corrección del lenguaje y estilo, sin embargo errores en el uso del lenguaje pueden nublar el correcto entendimiento del contenido y provocar evaluaciones negativas por parte los revisores.
- El estudio debe cumplir con todos los estándares aplicables de ética en la experimentación e integridad científica. Todos los estudios relacionados con seres vivos, líneas celulares, muestreo de campo o que tengan potenciales implicaciones de bioseguridad deben contar con las aprobaciones de un comité de ética institucional / IRB, así como con todos los permisos legales requeridos por el país donde se realiza la investigación.
- El manuscrito sigue estándares utilizados por la comunidad de su disciplina científica y garantiza la disponibilidad de los datos. La disponibilidad de los datos se puede realizar colocándolos como material suplementario del manuscrito o depositándolos en repositorios digitales confiables.
- Todos los autores han participado en el desarrollo del manuscrito, lo han leído y están de acuerdo con su envío a la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, y de ser aceptado, están de acuerdo que sea publicado según a la *Política de Acceso Abierto* de la revista.
- Todos los autores cumplen con los requisitos de autoría detallados en la *Política de Autoría*.
- El envío inicial del manuscrito consiste de un solo archivo, que incluye: el texto, las tablas y figuras en el mismo archivo. Las tablas y las figuras van luego del texto (no intercalarlas con el texto). Cada tabla y figura está en su propia página y está precedida por su leyenda. En caso de enviar Material Suplementario, se lo envía como archivos separados.
- Si es que hay figuras compuesta por varias imágenes, se colocó la leyenda de la figura y luego se pegó cada imagen separada. Cada imagen tiene su propia denominación a través de literales en mayúsculas (ej. A) colocados en la esquina inferior derecha de cada imagen.
- Siempre que sea posible, se proporcionan DOI o direcciones URL estables para las referencias.

AVISO DE DERECHOS DE AUTOR/A

Los autores que publiquen en la revista ACI Avances en Ciencias e Ingenierías aceptan los siguientes términos:

- Los autores conservarán sus derechos de autor y garantizarán a la revista el derecho de primera publicación de su obra, la cual estará simultáneamente sujeto a la *Licencia de reconocimiento de Creative Commons* que permite a terceros compartir la obra siempre que se indique su autor y su primera publicación esta revista.
- Los autores podrán adoptar otros acuerdos de licencia no exclusiva de distribución de la versión de la obra publicada, pudiendo de esa forma publicarla en un volumen monográfico o reproducirla de otras formas, siempre que se indique la publicación inicial en esta revista.
- Se permite y se recomienda a los autores difundir su obra a través de Internet:
- Antes del envío a la revista, los autores pueden depositar el manuscrito en archivos/repositorios de pre-publicaciones (preprint servers/repositorios), incluyendo arXiv, bioRxiv, figshare, PeerJ Preprints, SSRN, entre otros, lo cual puede producir intercambios interesantes y aumentar las citas de la obra publicada (Véase *El efecto del acceso abierto*).
- Después del envío, se recomienda que los autores depositen su artículo en su repositorio institucional, página web personal, o red social científica (como Zenodo, ResearchGate o Academia.edu).

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros o para su uso con otros fines.

aci
avances
en ciencias e
ingenierías

