



REPORTES CIENTÍFICOS

DE LA FACEN

ISSN 2078-399X (impreso)

ISSN 2222-145X (online)

Volumen 14

Número 1

2023

Proyecto experimental de seguimiento de estudiantes de las distintas ofertas académicas de grado de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN), de la Universidad Nacional de Asunción (UNA), San Lorenzo

Estudio químico-biológico del extracto crudo etanólico de hojas del *Schinus weinmanniifolia* Mart. Ex Engl (Molle'i) de la localidad de Pirareta (Cordillera, Paraguay)

Impacto del COVID-19 en las MIPYMES paraguayas: una pespectiva desde el tamaño, sector economico y antigüedad de la empresa

Riqueza de aves en el Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael y su zona de amortiguamiento-Paraguay

Validación de una metodología analítica para la cuantificación de la ciprofloxacina en huevos de gallinas mediante HPLC

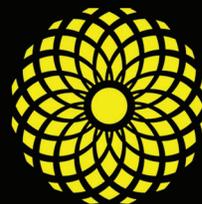
IoT aplicado al monitoreo en tiempo real de cultivos agrícolas

Estudio de la capacidad depuradora de *Pistia stratiotes* L. en el tratamiento de aguas residuales generados en el Laboratorio de Efluentes de FACEN-UNA

Análisis de la distribución espacial de parches de vegetación en Médanos del Chaco: Posibles indicios de un cambio de régimen catastrófico

Resolviendo la ecuación del movimiento armónico amortiguado mediante algunos métodos numéricos

Sonidos sísmicos en Paraguay



FACEN

Facultad de Ciencias
Exactas y Naturales

PUBLICACIÓN CIENTÍFICA
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN-PARAGUAY

REPORTES CIENTÍFICO DE LA FACEN



Reportes Científicos de la FACEN, es una revista de acceso libre y gratuito y es la publicación científica oficial de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción. Es emitida semestralmente y publica artículos originales, artículos de revisión, tópicos actuales, reportes de casos, comunicaciones cortas y cartas al editor, en las áreas de Biología, Química, Física, Matemática Pura, Matemática Estadística, Geología, Biotecnología y Tecnología de Producción. Los trabajos y opiniones publicados en la revista son de exclusiva responsabilidad de los autores.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Prof. Dra. Zully Vera de Molinas
Rectora

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Prof. Constantino Nicolás Guefos Kapsalis, MAE
Decano

Dirección Web

www.facen.una.py

REPORTES CIENTÍFICOS DE LA FACEN

Dirección postal

Reportes Científicos de la FACEN, Dirección de
Investigación, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Campus Universitario, Casilla de Correo 1039, San Lorenzo,
Paraguay

Teléfono/Fax

595 21 585600 interno 237

E-mail

reportescientificos@gmail.com

Dirección web

<https://www.facen.una.py/es/reportes-cientificos/>

Editor en Jefe

Prof. Dr. Fernando José Méndez Gaona, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

Comité Editorial Nacional

Dr. Bolívar Rafael Garcete Barrett
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

Lic. Nery López
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

Dra. Celeste Vega
Centro para el Desarrollo de Investigación Científica

Dra. Miriam Rolon
Centro para el Desarrollo de Investigación Científica

Dra. Antonieta Rojas de Arias
Organización Panamericana de la Salud - Paraguay

Comité Editorial Internacional

Dr. Robert Owen
Texas Tech University - Estados Unidos

Dra. Ana Honfi
Universidad Nacional de Misiones - Argentina

Dr. Julio Daviña
Universidad Nacional de Misiones - Argentina

Dr. Nicolás Niveiro
Universidad Nacional del Nordeste - Argentina

Dra. María Paula Badenes
Universidad Nacional de La Plata - Argentina

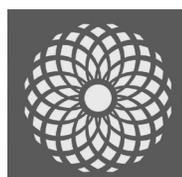
Dr. José Seguinot
Universidad de Puerto Rico - Puerto Rico

Dr. Ángel Vara Vela
Universidad de São Paulo - Brasil

Dr. Fábio Luis Teixeira Gonçalves
Universidad de São Paulo - Brasil

Dr. Víctor Velázquez
Universidad de São Paulo - Brasil

Dr. Sebastián Simondi
Universidad Nacional de Cuyo - Argentina



FACEN

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Asunción

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol. 14, Nº 1	Enero - Junio de 2022	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	------------------	--------------------------	---

REPORTES CIENTÍFICOS

DE LA FACEN

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol. 14, Nº 1	Enero - Junio de 2023	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	------------------	--------------------------	---

ARTÍCULOS ORIGINALES

- 3–10 **Stella Guefos de Fuster & Marlene Román de Del Puerto.** Proyecto experimental de seguimiento de estudiantes de las distintas ofertas académicas de grado de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN), de la Universidad Nacional de Asunción (UNA), San Lorenzo.
- 11–24 **Francisco P. Ferreira B., Mauro Vicentini, Juliana Moura, Alfredo Acosta & Miguel Martinez.** Estudio químico-biológico del extracto crudo etanólico de hojas del *Schinus weinmanniifolia* Mart. Ex Engl (Molle'i) de la localidad de Pirareta (Cordillera, Paraguay).
- 25–34 **Edgar A. Sánchez Báez, José M. Román, María Paz Brassel & Diego Sebastián Parra.** Impacto del COVID-19 en las MIPYMES paraguayas: una perspectiva desde el tamaño, sector económico y antigüedad de la empresa.
- 35–49 **Patricia Salinas, Alberto Esquivel & Juan Emanuel Pech.** Riqueza de aves en el Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael y su zona de amortiguamiento-Paraguay.
- 50–61 **Julio César Benítez-Villalba, Martiniano Barrios & Mercedes Benítez-Peña.** Validación de una metodología analítica para la cuantificación de la ciprofloxacina en huevos de gallinas mediante HPLC.
- 62–69 **Federico Fernández.** IoT aplicado al monitoreo en tiempo real de cultivos agrícolas.
- 70–77 **Elsa Cárdenas, Zunilda Allende, María Ferreira, Alan Velázquez & Christian Vogt.** Estudio de la capacidad depuradora de *Pistia stratiotes* L. en el tratamiento de aguas residuales generados en el Laboratorio de Efluentes de FACEN-UNA.
- 78–90 **Rubén Fernández & Gustavo Mereles Menesse.** Análisis de la distribución espacial de parches de vegetación en Médanos del Chaco: Posibles indicios de un cambio de régimen catastrófico.
- 91–97 **Salustiano Vega, Jorge Jara, Osvaldo Vega, Gustavo González & Crispín Vargas.** Resolviendo la ecuación del movimiento armónico amortiguado mediante algunos métodos numéricos.
- 98–102 **Alcides Caballero, Moisés Gadea, Rafael Fugarazzo & Vincent Figueres.** Sonidos sísmicos en Paraguay.



Proyecto experimental de seguimiento de estudiantes de las distintas ofertas académicas de grado de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN), de la Universidad Nacional de Asunción (UNA), San Lorenzo

Experimental project for monitoring students in the different academic degree programs of the Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN), at the National University of Asuncion (UNA), San Lorenzo

Stella Guefos de Fuster¹  & Marlene Román de Del Puerto^{2,*} 

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Tecnología de Producción, San Lorenzo, Paraguay.

²Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Estadística, San Lorenzo, Paraguay.

*Autor correspondiente: mroman@facen.una.py.

Resumen: Este trabajo se realizó con la finalidad de disponer de datos confiables y oportunos que colabore en mejorar las estrategias de gestión académica a nivel de Departamentos de carrera, mediante el acceso a los elementos de orientación académica que permitan posteriormente la identificación de indicadores estadísticos de monitoreo y seguimiento académico e implementación de acciones que permitan el egreso oportuno de los estudiantes de las diferentes carreras de grado de la FACEN. El estudio se realizó con 3 (tres) Departamentos de Carrera con su estructura organizacional: Matemática, Estadística y Química. La investigación es de tipo cuantitativo, con un diseño explicativo, longitudinal y no experimental. La información se recolectó a partir de datos secundarios (informes de eficacia y eficiencia) y la encuesta a 6 (seis) gestores académicos sobre la percepción de utilidad del programa, los cuales fueron analizados según el cumplimiento de los objetivos del programa de seguimiento a estudiantes y la percepción de utilidad. Los resultados demostraron que los gestores académicos tengan la percepción de que constituyen en aspectos significativos para el cumplimiento de sus funciones y el compromiso de realizar la orientación académica al estudiante por permanecer en el programa académico que cursa. En la medida que las capacidades y la gestión de apoyo sean positivas, los estudiantes contarán con interacciones favorables que apoyarán su participación a nivel institucional, lo cual favorecerá su desarrollo intelectual y académico. Finalmente, se concluye que a nivel de política institucional resulta relevante gestionar el apoyo de las capacidades y la adaptación de los estudiantes, ya que se contribuirá en la generación de un equilibrio positivo entre la integración académica y social, a partir de la configuración de elementos que apoyarán el desarrollo de un contexto de motivación que permitirá mantener el compromiso de los estudiantes por el logro del egreso oportuno.

Palabras Clave: *Orientación Académica, monitoreo, seguimiento, egreso oportuno*

Abstract: This work was carried out with the purpose of having reliable and timely data that collaborates in improving the strategies of academic management at the level of career Departments, through access to the elements of academic orientation that later allow the identification of statistical indicators of monitoring and academic follow-up and implementation of actions that allow the timely graduation of students from the different FACEN degree courses. The study was carried out with 3 (three) Career Departments with their organizational structure: Mathematics, Statistics and Chemistry. The research is quantitative, with an explanatory, longitudinal and non-experimental design. The information was collected from secondary data (effectiveness and efficiency reports) and the survey of 6 (six) academic managers on the perception of the utility of the program, which were analyzed according to the fulfillment of the objectives of the student monitoring program. and the perception of usefulness. The results showed that the academic managers have the perception that they constitute significant aspects for the fulfillment of their functions and the commitment to carry out the academic orientation to the student for remaining in the academic program that they are studying. To the extent that the capacities and support management are positive, the students will have favorable interactions that will support their participation at the institutional level, which will favor their intellectual and academic development. Finally, it is concluded that at the level of institutional policy it is relevant to manage the support of the abilities and the adaptation of the students, since it will contribute to the generation of a positive

Recibido: 13/10/2023 Aceptado: 14/04/2023



balance between academic and social integration, based on the configuration of elements that will support the development of a motivational context that will allow maintaining the commitment of the students for the achievement of the timely graduation.

Keywords: *Academic Orientation, monitoring, follow-up, timely graduation.*

Introducción

La ORELAC – UNESCO (2007) sustenta como derecho fundamental de todos los individuos el acceso a la educación de calidad, basados en la equidad, la relevancia y la pertinencia incorporando a la eficacia y eficiencia en sus componentes operativos.

Es innegable la importancia de la orientación académica como componente operativo de la calidad en las instituciones educativas y que los elementos principales para su éxito son la disponibilidad de información e implementación de indicadores de monitoreo y seguimiento de la situación académica de los estudiantes y del desempeño docente. Por lo tanto, ha surgido una serie de intentos por implementar cambios metodológicos que favorezcan el aprendizaje (no solo conocimiento académico) de los estudiantes al ser los protagonistas de su proceso universitario, convirtiéndose en el artífice de su aprendizaje y responsable del tránsito por la universidad.

En FACEN la Gestión Académica precisamente la Orientación académica oportuna tropezó con dificultades al no contar con herramientas de acceso a software especializado que apoyen a los gestores académicos y/o a personal de apoyo del nivel de Departamento de Carreras, es así que la necesidad de acceso oportuno o ampliación del acceso parcial al cual ya tienen los gestores académicos se concretó en la ampliación de la información académica que globalice no solo información sobre los estudiantes sino estrategias o metodologías de apoyo a la orientación académica, con indicadores de eficacia y eficiencia de sus funciones, esto dio nacimiento al programa experimental de seguimiento de estudiantes, mediante la identificación e integración de los elementos académicos ya existentes en la FACEN (ficha del alumno, recuento de créditos académicos, diagrama de asignaturas de la malla curricular de la oferta de grado, etc.) y la metodología de seguimiento y monitoreo de la situación académica,

presentándolo en un formato integrado con acceso web a la información académica estudiantil de relevancia, alimentada mediante los registros académicos del ACAd5, administrado por la FACEN a través de las instancias institucionales responsables.

Es bueno destacar que hasta el año 2014 no se había desarrollado indicadores académicos ni establecido una metodología sobre orientación académica o mecanismos de seguimiento y monitoreo, que evidencie estrategias de intervención certera a los gestores académicos, ante esta debilidad detectada y teniendo los principales resultados de la Investigación longitudinal liderada por el equipo de la Dirección de Auditoría Académica plasmados en el libro “Seguimiento a Ingresantes. Cohorte 2001 al 2005”, presentado en el mes de abril del año 2014, con datos relevantes de los primeros indicadores de permanencia (promedio de años para egresar), la cuantificación porcentual de la retención como problemática principal, así como también el bajo porcentaje de egreso que no solo comprometía la eficacia o eficiencia de la gestión institucional sino la posibilidad de dejar de contar con profesionales del grado del área de la ciencia (únicas en el país) que abarca la Institución y cuyo impacto directo compromete el proceso de desarrollo del país.

En este estudio experimental lanzado en el año 2014, se concretó el mecanismo de acción integrada de la información académica oportuna a través del uso de herramientas tecnológicas y orientaciones precisas sobre los aspectos más relevantes en una gestión académica, planteadas a todas las carreras de grado de FACEN. Estos aspectos relevantes en la gestión académica abarcaron la situación académica de todos y cada uno de los estudiantes matriculados (avance de aprobación de asignaturas y sus implicancias) e identificación de situaciones problemáticas como retención, deserción que comprometieron el egreso oportuno de los estudiantes e incluso el abandono. Con esta acción los gestores académicos

y en especial los del proceso de aseguramiento de la calidad de educación superior, compromiso exigidos por procesos externos de evaluación de la calidad en educación, serían salvaguardados.

El objetivo de la investigación fue disponer de datos confiables y oportunos que colabore en mejorar las estrategias de gestión académica a nivel de Departamentos de carrera, mediante el acceso a los elementos de orientación académica que permitan posteriormente la identificación de indicadores estadísticos de monitoreo y seguimiento académico e implementación de acciones que permitan el egreso oportuno de los estudiantes de las diferentes carreras de grado de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) de la Universidad Nacional de Asunción.

Materiales y Métodos

La orientación académica del estudiante debe apoyarse mediante estudios de cohortes de ingresantes, que abarque la revisión de información referente a su ingreso, rendimiento académico, y de créditos de extensión universitaria este último, condición conjunta para titulación presente en el plan actual vigente y garantizados en el Estatuto de la UNA, la cual no solo permitió la identificación oportuna de las problemáticas sino buscar estrategias de intervenciones más oportunas mediante las orientaciones académicas apropiadas.

Se planteó como punto de partida la delimitación de la población a ser monitoreada por la Coordinación de Grado del Departamento, siendo los estudiantes matriculados en el primer periodo del año 2015, con criterio de intervención de aproximadamente 33 asignaturas aprobadas para garantizar el cumplimiento de los 30 créditos mínimos exigidos por extensión universitaria, iniciando así el monitoreo para la intervención en la población estudiantil en aquellos estudiantes que hayan aprobado el 80% o más de las asignaturas de la malla curricular vigente, que no solo permitió garantizar el cumplimiento efectivo de ambos requisitos de titulación: académico y de extensión universitario sino que estas sean cumplidas en forma simultánea.

Fue en octubre del año 2015 que en forma con-

jointa las autoras desde el cargo institucional en que nos desempeñábamos en la FACEN, convocamos a la reunión con todos los Departamentos de carreras de grado la presentación de la propuesta del “Proyecto Experimental de Seguimiento a Estudiantes” a fin de vincular en su primera fase a las Direcciones con las Coordinaciones de Académicas y las Coordinaciones de Extensión en el seguimiento y monitoreo del cumplimiento oportuno de los requisitos de titulación y sentar las bases para la implementación del mecanismo de Orientación Académica, en tanto se avanzaba esta primera fase se procedería a la segunda fase del proyecto que fue involucrar a la Coordinación de Postgrado e Investigación, para fortalecer el monitoreo de la inserción del estudiante en el campo de la investigación atendiendo que la institución estaba iniciando la implementación del Programa de Iniciación Científica (PIC), cabe señalar que esta segunda fase finalmente aún no ha sido aplicado y que la fase uno si bien solo contamos con dos departamentos que lo implementaron los resultados son alentadores.

Un punto no menor fue lograr articular ambas actividades y su implementación efectiva en todas las carreras de grado, aunque finalmente solo se concretó en 3 (tres) Departamentos, en menor o mayor avance de implementación, y que en este caso pueden servir como referencia de buenas prácticas.

Además, el Programa Experimental de Monitoreo y Seguimiento a través de la Orientación Académica se constituyó en el órgano institucional que posee la información, como fuente primaria de la gestión, necesaria para implementar acciones que ayuden a mejorar las prácticas docentes.

Materiales

Se planteó la accesibilidad de las informaciones académicas de cada estudiante a través del formato web a usuarios del nivel de Departamento de Carrera (Director/a y Coordinaciones) a fichas del estudiante, los reportes de ingresantes y el recuento de créditos mínimos en actividades de extensión de horas de extensión universitaria. Así mismo se construyó los diagramas de asignaturas para todas y cada una de las carreras de grado de la FACEN,

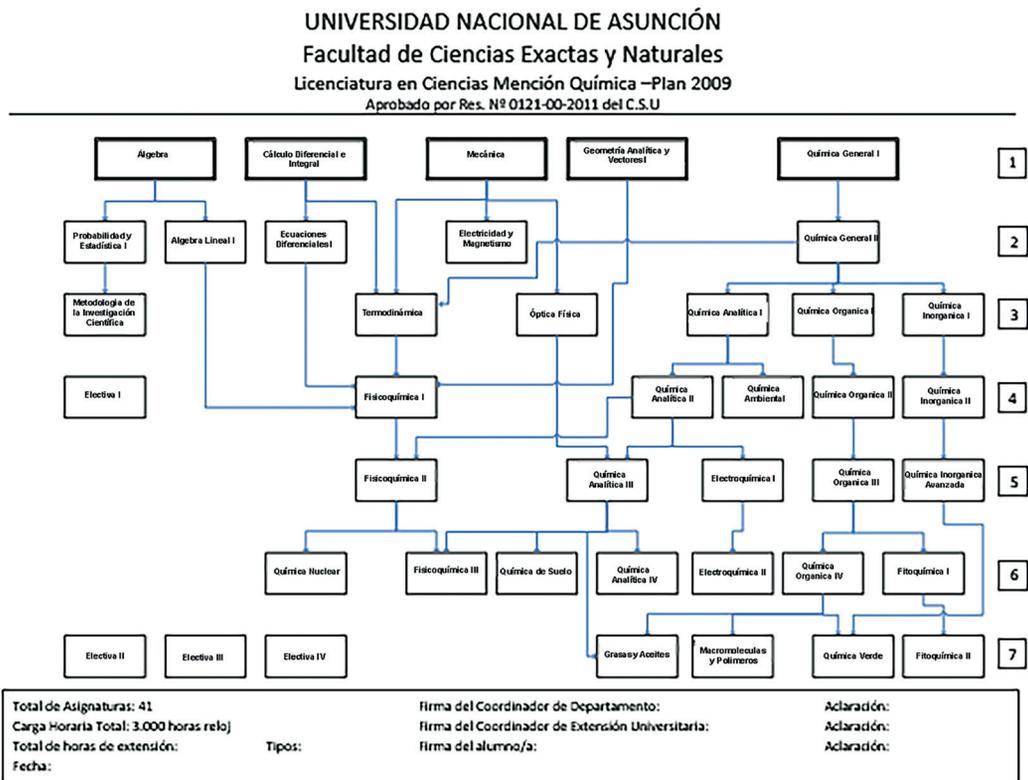


Figura 1. Diagrama de Asignaturas- Química-Plan 2009.

que integró en un gráfico la propuesta de avance efectivo de las asignaturas y el flujograma de los prerequisites establecidos en el plan curricular vigente.

Los Diagramas de Asignaturas (Fig. 1), fueron construido como elemento físico de la articulación ideal del sistema de prerequisites y el avance académico efectivo para la culminación de la carrera, conforme el Plan Curricular prevé en su duración: 4 años (equivalente a 8 semestres). Si bien existen varias herramientas tecnológicas para sistematizarla (Microsoft Excel, Microsoft Acces, u otra plataforma), su construcción física propició la visualización en un solo gráfico la implicancia de varios elementos que componen la Malla Curricular de grado de las diferentes carreras de grado de la FACEN, como son la cantidad total de asignaturas, los prerequisites, el ideal de cursado conforme a los contenidos de cada asignatura y la flexibilidad de incorporar a las asignaturas electivas. Sumado a esto se incorporó al pie del diagrama de asigna-

turas el recuento del total de horas de créditos de extensión y la clasificación de la actividad en que fue realizada.

La Ficha de alumno recortada y de versión web (Fig. 2). Este instrumento de fácil acceso mediante el aplicativo informático de disponibilidad por los usuarios autorizados por los Directores o Directoras de los Departamentos, es otro de los materiales físicos que permitieron acceder a la información académica oportuna de los estudiantes sin comprometer la gestión de los archivos académicos de la Institución.

Planilla de Entrevista a estudiantes aplicado por las coordinaciones de grado y de extensión para la Orientación de los avances académicos y las recomendaciones dadas sobre el proceso de cursado de asignaturas y las actividades de extensión requeridas para el cumplimiento de los criterios de egreso.

Muestra y Métodos

Inicialmente la propuesta metodológica abarcó a 09

Resumen de Ficha del Estudiante

Cédula: Nombre y apellido:

Carrera: 2011A Tipo Ingreso: I Año Ingreso: 2011

Dirección: OCEANIA C/ FCO PAREDES Período:

Teléfono: 431521 Fecha Ingreso:

Grupo Sanguíneo: Celular:

codigo	Asignatura	Nota	Año	Fecha Inscripción
27Q	Química General	1	2012	2012-11-21 10:40:30.082
53M	Álgebra y Geometría Analítica	1	2011	2011-07-06 18:45:24.641
27Q	Química General	3	2012	2012-12-11 17:18:14.481
47B	Bioseguridad, Ética y Legislación	4	2013	2013-06-26 12:33:32.147
56M	Cálculo y Ecuaciones Diferenciales I	1	2012	2012-07-26 09:23:32.804
56M	Cálculo y Ecuaciones Diferenciales I	1	2011	2011-12-09 07:55:57.552
27Q	Química General	1	2011	2011-12-15 07:37:59.784
28Q	Química Orgánica	1	2013	2013-07-03 08:25:17.467
70F	Física General	2	2011	2011-12-22 09:01:38.104
34B	Biología	3	2011	2011-07-13 07:24:55.028
53M	Álgebra y Geometría Analítica	2	2011	2011-12-12 07:22:45.995
56M	Cálculo y Ecuaciones Diferenciales I	2	2012	2012-12-20 17:11:53.691
42B	Genética	1	2014	2014-07-07 19:26:00.857
70F	Física General	1	2011	2011-07-14 17:56:19.551
31T	Gestión de Procesos de Producción, O	3	2014	2014-07-03 17:33:44.765
54M	Bioestadística I	3	2013	2013-07-12 13:31:40.225
65B	Virología Molecular	2	2014	2014-06-30 08:42:20.283
27Q	Química General	1	2011	2011-07-19 18:50:10.159
72F	Fundamentos de Física Moderna	1	2014	2014-12-05 08:57:13.102
28Q	Química Orgánica	2	2013	2013-07-17 10:23:44.917
32T	Gestión de Proyectos	4	2014	2014-12-05 19:29:42.16
35B	Biología Celular Molecular	2	2011	2011-11-29 14:14:16.25
16C	Metodología de la Investigación Cient	4	2014	2014-12-01 18:48:36.355
30T	Economía y Gestión de Empresas	4	2013	2013-11-27 11:24:04.473
42B	Genética	2	2014	2014-11-24 18:21:16.103

Créditos de Extensión a la fecha: 3.33

Fecha Entrevista: Firma y Aclaración del Estudiante:

Prof. Presente:

Figura 2. Ficha del estudiante disponible de acceso online.

(nueve) Departamentos de carreras de grado de la FACEN cuyas carreras de grado posean al menos tres cohortes de egresados.

Finalmente, esta propuesta metodológica de

orientación académica personalizada fue implementado en 3 (tres) de las 09 (nueve) Departamentos de carrera, si bien la cobertura pudiera no satisfacer la propuesta inicial, la experiencia de implementación

efectiva puede constituirse en buenas prácticas para la Gestión Académica y que el sujeto (estudiante) que aprende haya sido objeto de atención individual, como estrategias de autorregulación, de autocontrol y que permitió redimensionar su propio trazo académico.

En la FACEN además de la sistematización de los datos que realiza la Dirección Académica con soporte técnico del Departamento de Sistemas, que suministra los recuentos de estudiantes y sus calificaciones, así como datos generales, recuento de ingresantes, egresados, y otras características discriminados por sexo, nacionalidad etc., por sí mismo no fueron suficientes para establecer el monitoreo oportuno y acabado de los procesos académicos estudiantil; tal es así que se aplicó mediante este programa experimental la orientación académica tanto disciplinar como general de los estudiantes y estableció estrategias de gestión en asignaciones docentes (rotaciones o reasignaciones) en asignaturas con problemáticas de alta retención o aplazo o identificación de asignaturas mal llamadas asignaturas de cuello de botella.

Además de recopilar los principales resultados de implementación tomando como fuente los

informes de gestión de las coordinaciones de los Departamentos de Matemática, de Química y de Estadística, también se complementó con la aplicación de una Encuesta a 3 (tres) coordinadores y 2 (dos) directores de los tres departamentos de carreras que lo han implementado, para medir la “Percepción Sobre el Uso del Programa Experimental Seguimiento de Estudiantes”, esta encuesta abarca aspectos como: Acceso a los Datos o Insumos de la Información; Impacto Directo en cuanto a Acceso a Información Académica de estudiantes; Dificultades con que ha tropezado al intentar implementar el proyecto experimental de Seguimiento a Estudiantes; Sugerencias para fortalecer la implementación efectiva de este proyecto.

Resultados y Discusión

En todos estos años de implementación gradual de la propuesta metodológica, se puede apreciar una implementación diferencial desde incipiente a integral en los 3 (tres) Departamentos y según los Informes de Gestión de dicho proceso de seguimiento o monitoreo se tiene lo que está reflejado en la Tabla 1.

Tabla 1. Objetivos y actividades implementadas por el Programa de Seguimiento a Estudiantes.

Objetivos del Programa de Seguimiento de Estudiantes	Departamentos de Carrera		
	Matemática	Estadística	Química
Establecer Mecanismo estándar de seguimiento de estudiantes con evidencias documentales.			
1 Obtención de Fichas de Alumnos	X	X	X
2 Establecer situación académica de cada estudiante	X	X	X
3 Realizar Orientación Académica al Estudiante	X	X	X
4 Control de la Cantidad de Créditos de Extensión	X	X	X
Obtener datos de estudios de cohortes a nivel de carreras para la construcción de indicadores académicos.			
5 Indicadores de Abandono	NO APLICADO	X	X
6 Indicadores de Aplazo		X	X
7 Indicadores de Promedio		X	X
8 Identificación de Asignaturas Críticas		X	X
9 Indicar de Retención		X	X
10 Año promedio de permanencia		X	X
11 Indicador de Egreso		X	X
Disponer de datos confiables y oportunos para establecer estrategias académicas a nivel de departamentos de carrera.			
12 Identificación de causas de aplazo en Asignaturas Críticas	NO	X	X
13 Aplicación de Estrategias de gestión académica	APLICADO	NA	X
Fuente: Informes de Departamentos sobre eficacia y eficiencia interna del Plan de Estudios			

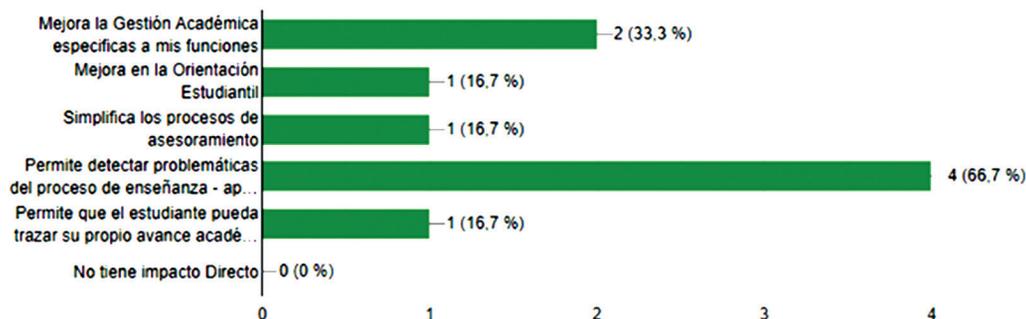


Figura 3. Impacto Directo en la Gestión Académica (Fuente: Encuesta de Percepción sobre el Programa de Seguimiento de Estudiantes).

Este programa ha sido implementado en forma incipiente en el Departamento de Matemática, intermedia en Estadística y en forma integral e incluso a nivel de programas de postgrado en el Departamento de Química.

Para complementar la información se procedió a realizar una encuesta a 6 (seis) Gestores Académicos de Departamentos de carrera (1 Director y 5 Coordinadores) con los siguientes resultados que se ven en la Figura 3 y la Tabla 2.

Los gestores académicos coinciden en el requerimiento de una plataforma informática más ágil y oportuno acceso a la información.

Conclusiones

El Programa Experimental de Seguimiento a Estudiantes ha contribuido a los aspectos como:

- A acceder a una nueva visión del proceso de seguimiento o monitoreo. Los Gestores Académicos lo aprecian como una herramienta útil para mejorar sus funciones y se siente participe activo en él.
- A un nuevo enfrentamiento al abordaje de la Orientación Académica del plan de estudios. Lo reorienta hacia un avance efectivo del proceso académico estudiantil.
- A la simplificación del proceso, hacién-

Tabla 2. Fortalezas, Debilidades y Sugerencias de Mejoras del Programa de Seguimiento a Estudiantes (Fuente: Informes de Departamentos sobre eficacia interna del plan de estudios).

Fortalezas - Debilidades- Sugerencias del Programa	Departamentos de Carrera		
	Matemática	Estadística	Química
Fortalezas			
1 Entender la problemática académica de los estudiantes		X	
2 Conocer el área en el que mejor se desenvolvían los estudiantes		X	
3 Visualizar las dificultades del estudiante en determinadas asignaturas			X
4 Proponer medidas correctivas			X
5 Monitoreo de la cantidad de créditos de extensión	X	X	X
6 Pautas para planificar las actividades	X		
Debilidades			
1 El acceso a la información está desactualizada	X	X	X
2 Debilidad en la sistematización del Plan de Seguimiento	X	X	X
Sugerencias			
1 Disponer de una Plataforma ágil y amigable para el procesamiento de datos		X	
2 Disponer de resúmenes de reportes de extensión universitaria y académicos	X	X	
3 El seguimiento y monitoreo, no debe centrarse solo en los estudiantes, si no también al entorno académico y el mismo programa de estudio			X
4 Hacer participes a los Coordinadores en la Planificación de las actividades del Programa	X		

Fuente: Informes de Departamentos sobre eficacia y eficiencia interna del Plan de Estudios

dolo, cada vez, de modo más dinámico, activo y directo, lo que le sirve para transformar su propio quehacer en la gestión académica.

- A la problematización, base para la investigación tanto de las prácticas docentes como la del desempeño de los educandos, así como para su perfeccionamiento con la metodología utilizada.
- El sujeto (estudiante) que aprende debe ser objeto de atención individual en tanto se propicie la elaboración de estrategias de autorregulación, de autocontrol que tributan a que éste pueda analizar y redimensionar su propio trazo académico.

Agradecimientos

Especial agradecimiento Prof. Lic. Nicolás Guefos Kapsalis, MAE, Decano de la Facultad de Ciencias y Naturales. Al Prof. MSc. José von Lucken, Director Académico (2012-2015) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por las orientaciones técnicas dadas para sentar las bases del programa. A los funcionarios del Departamento de Sistemas, de Matemática, Estadística y de Química de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales por facilitar las evidencias de la implementación efectiva del Proyecto.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equi-

tativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Vaillant Alcalde, D.E. & Rodríguez Zidán, E. (2018). Perspectiva de UNESCO y OEI sobre la Calidad de la Educación. Pp. 136–154, *in* Monarca, H. (Ed.). *Calidad de la Educación en Iberoamérica: Discursos, políticas y prácticas*. Madrid: Dykinson e-Book. 223 pp.
- García Cabrero, B., Loredó Enríquez, J. & Carranza Peña, G. (2008). Análisis de la práctica educativa de los docentes: pensamiento, interacción y reflexión. *REDIE: Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 10(nº esp. 1): 1–15.
- Caballero Montañez, R. (2013). *El “Buen Docente”: estudio cualitativo desde la percepción de egresados de educación secundaria*. Disertación de Maestría. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. 92 pp.
- Gálvez Suarez, E. & Milla Toro, R. Evaluación del desempeño docente: Preparación para el aprendizaje de los estudiantes en el marco de buen desempeño docente. *Propósitos y Representaciones*, 6(2): 407–452.

Estudio químico-biológico del extracto crudo etanólico de hojas del *Schinus weinmannifolia* Mart. Ex Engl (Molle'i) de la localidad de Pirareta (Cordillera, Paraguay)

Chemical and biological study of ethanolic raw extract of leaves from *Schinus weinmannifolia* Mart ex Engl (Molle'i) in the location of Pirareta (Cordillera, Paraguay)

Francisco P. Ferreira B.^{1,*}, Mauro Vicentini², Juliana Moura³, Alfredo Acosta¹ & Miguel Martínez¹

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN), San Lorenzo, Paraguay.

²Universidade de Brasília, Instituto de Química (IQ), Brasília, Brasil.

³Universidad Nacional de Asunción, Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas (CEMIT), San Lorenzo, Paraguay.

*Autor correspondiente: licfranferre10@gmail.com.

Resumen: El *Schinus weinmannifolia* (Molle'i) es una de las plantas empleadas en forma de infusión de las hojas para tratar amigdalitis, dolores de garganta, tos e inflamaciones de la encía. Para tratar de establecer una relación entre los metabolitos secundarios presentes y sus actividades biológicas se determinó el Perfil Fitoquímico Cualitativo del extracto crudo, Compuestos fenólicos totales, Flavonoides Totales así como Actividad Antioxidante, Actividad Hemolítica y DL_{50} en *Drosophila melanogaster*. Los resultados revelaron la presencia de Taninos hidrolizables, saponinas y esteroides. En los bioensayos se observó elevada Actividad de Antioxidantes (IC=39,9%) y una actividad antimicrobiana del extracto bruto etanólico frente a cepas de *E. coli*, *S. typhimurium*, *E. faecalis*, *P. aeruginosa*, *C. albicans*. Se estableció una DL_{50} de 15,3 mg.mL⁻¹ en *Drosophila melanogaster* y además una actividad hemolítica de IC₅₀ de 179 µg.mL⁻¹ con una actividad del 55,9 %. Estos valores representaron un primer aporte a fin de determinar científicamente su actividad biológica y correlacionar con el contenido de moléculas.

Palabras claves: Perfil Fitoquímico, Compuestos Fenólicos, Flavonoides, Antioxidante, Antimicrobiano, Actividad Hemolítica.

Abstract: The *Schinus weinmannifolia* (Molle'i) is a plants used in infusion of leaves to treat tonsillitis, sore throats, cough and inflammation of gum. We try to establish a relationship between the secondary metabolites present and their biological activities, the qualitative Phytochemical Screening of the crude extract, Total Phenolic compounds, Total Flavonoids as well as Antioxidant Activity, Hemolytic Activity and LD_{50} in *Drosophila melanogaster* was determined. The results revealed the presence of hydrolysable Tannins, saponins and sterols. In the bioassays, high Antioxidant Activity (IC = 39.9%), and an antimicrobial activity of the ethanolic crude extract were observed against strains of *E. coli*, *S. typhimurium*, *E. faecalis*, *P. aeruginosa*, *C. albicans*. An LD_{50} of 15.3 mg.mL⁻¹ was established in *Drosophila melanogaster* and also a hemolytic activity of IC₅₀ of 179 µg.mL⁻¹ with an activity of 55.9%. These values represented a first contribution in order to determine scientifically their biological activity and correlate with the content of molecules.

Keywords: Phytochemical screening, Phenolic Compounds, Flavonoids, Antioxidant, Antimicrobial, Hemolytic Activity.

Introducción

Una planta puede denominarse medicinal cuando al menos una parte de esta posee propiedades curativas. Puede estar contenida en la Farmacopea, pero ésta puede también contener plantas que no siendo medicinales son útiles en farmacia. Una planta no inscrita en la Farmacopea puede constituir un medicamento, incluso aunque no se la considere como

planta medicinal (Bruneton, 2001).

Básicamente, el estudio de las plantas medicinales es desarrollado a través de la Fitoquímica que es considerada como una herramienta en el descubrimiento de moléculas a partir de ellas, además de establecer una relación entre la presencia de metabolitos secundarios y su actividad biológica (Heinrich et al., 2006).

El uso de plantas medicinales y aromáticas es

Recibido: 15/04/2019 Aceptado: 14/04/2023



una costumbre atávica y tiene su origen en el nacimiento del hombre; está basada en la experiencia que forma parte de la tradición de los pueblos, son conocimientos ancestrales que se transmiten de generación en generación y, particularmente en forma verbal (Heinrich et al., 2006).

La familia Anacardiaceae es un grupo de plantas esencialmente arbóreas y arbustivas perteneciente al orden Sapindales. La constituyen 77 géneros con unas 700 especies aceptadas, de las casi 3000 descritas, propias de países tropicales, cálidos y templados (Tropicos, 2018) (Fig. 1), y con cerca de 30 especies nativas en su mayoría se encuentran en América Central y del Sur (Perrotta & Arambarri, 2004).

Uno de los géneros más estudiados en América del Sur y Centro es el *Schinus*. Dentro de éste género podemos mencionar especies ampliamente estudiadas como el *Schinus molle*, *Schinus terebinthifolius*, *Schinus Lentifolius*. Una de las especies con escasos estudios pero prometedores por su información etnobotánica e la del *Schinus weinmannifolia*.

Varios estudios han encontrado que las especies vegetales mayormente investigadas de la familia de las Anacardiaceae son: *S. terebinthifolius*, *S. molle*, y *S. weinmannifolius* y los cuales son comunes

en América del Sur y tienen diversas actividades biológicas como antiviral en el extracto crudo hidroalcohólico y acuoso contra *Herpes simplex virus type I* en líneas celulares Vero (Jarbas et al., 2004), cicatrizante vía tópica en ratones Wistar (Branco Neto et al., 2006), antiulceroso (Bacchi, 1986) además de otras actividades.

El aceite esencial del *Schinus molle* se mostró que a que en bajas concentraciones presentaban un efecto adverso en ensayos *in vivo* (Ferrero et al., además de ser antitumoral en otros estudios a concentraciones específicas (Díaz & Quesada, 2008).

En el extracto crudo de hojas del *Schinus terebinthifolius* se encontraron efectos positivos como cicatrizante interno en la úlcera estomacal (Carlini et al 2010), cicatrizante externo en pruebas hechas con ratones (Branco Neto et al., 2006) y el aceite esencial posee una actividad antidepresiva (Piccinelli et al., 2014).

Durante varias investigaciones Fitoquímica de éste género se han reconocido diferentes metabolitos secundarios como sesquiterpenos, triterpenos (Gehrke et al., 2013), flavonoides, taninos, saponinas esteroidales, esteroides y en algunos aceites esenciales (Díaz & Quesada, 2008; Erazo et al., 2004). Los estudios hechos con *Schinus*

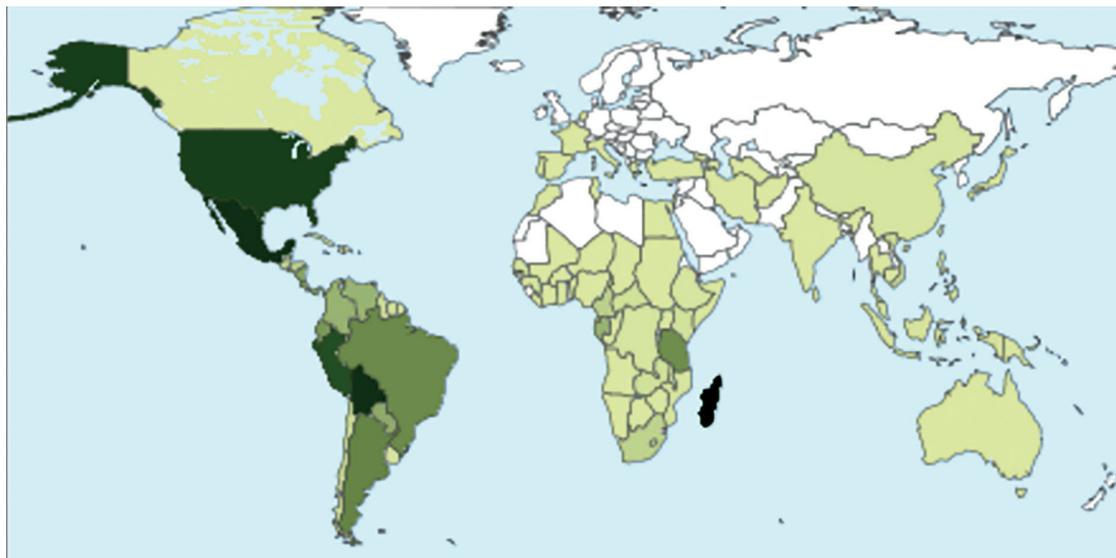


Figura 1. Distribución de las Anacardiaceae (Fuente: Tropicos, 2018).

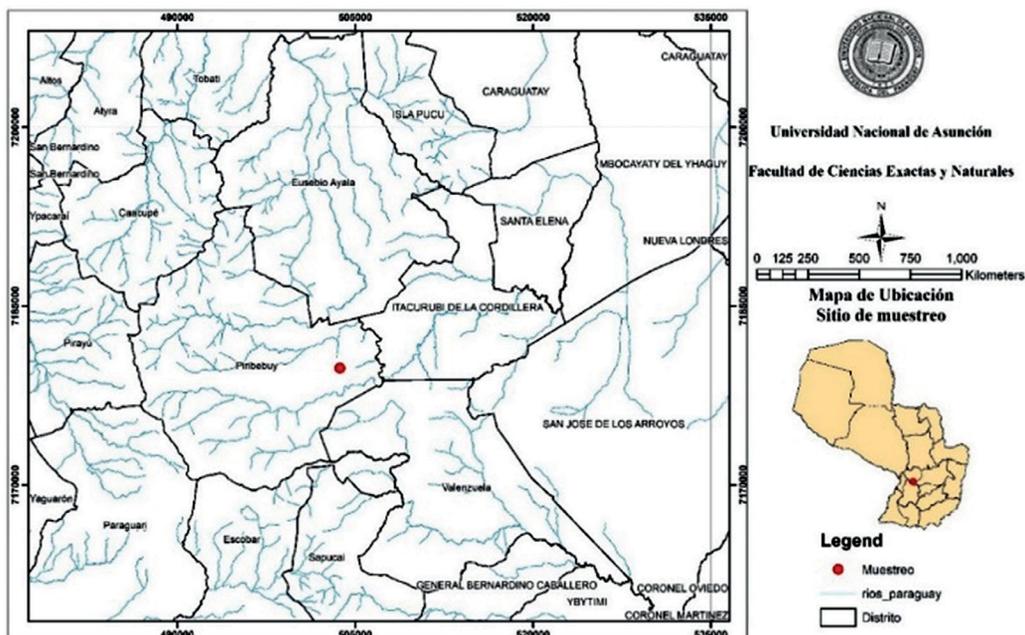


Figura 2. Zona de Muestreo.

lentiscifolius aún son escasos salvo actividad antimicrobiana los cuales arrojaron resultados muy prometedores (Gehrke *et al.*, 2013) y antiviral contra herpes tipo 1 (Jarbas *et al.*, 2004).

Este trabajo está orientado a determinar los posibles grupos de compuestos presentes y establecer a través de bioensayos su actividad al extracto crudo etanólico proveniente de las hojas del *Schinus weinmannifolius*.

Materiales y Métodos

Muestreo

Las hojas de la especie estudiada fueron colectadas en Piraretá (Fig. 2), distrito de Piribebuy del Departamento de Cordillera coordenadas geográficas -25.499000, 56.963194. (Fig. 2). Partes representativas de la planta se emplearon en la identificación taxonómica en el Laboratorio de Análisis de Recursos Vegetales-Herbario FACEN por un experto del laboratorio y una muestra colectada fue depositada en el Herbario LAREV-FACEN bajo la identificación FACEN N° 4050.

Preparación del Material Vegetal para Extracción

Una cantidad de 10 Kg de material vegetal fresco (Fig. 3) fue secado a temperatura ambiente

(20°C) bajo sombra sobre pallets de madera por aproximadamente 1 semana, con escasa aireación, para evitar la acción del oxígeno, la luz, la temperatura y microorganismos; factores que podrían transformar los compuestos originales en compuestos biotransformados. Luego, se procedió a la trituración del material vegetal con la ayuda de un molino manual a tornillo hasta la obtención de un polvo homogéneo.



Figura 3. Material Vegetal colectado – *Schinus weinmannifolia*.

Elaboración de extracto crudo

Se realizó la maceración exhaustiva de 5 Kg de material triturado homogéneo con Etanol 96 % durante un mes, bajo agitación de 3 veces por semana. Transcurrido el tiempo, se procedió a la filtración de la fracción líquida por gravedad a través de un embudo de vástago provisto de gasa estéril. El residuo sólido se sometió al mismo proceso tres veces, con tiempos de maceración de 1 semana y hasta que no presente coloración los líquidos de lavado (aproximadamente un mes). Los extractos fueron unificados y posteriormente fueron evaporados con Rotavapor y el extracto crudo así obtenido (SC) se transfirieron a un frasco de vidrio ámbar y se mantuvo en refrigeración a 4 ± 0.5 °C. Se determinó el rendimiento de extracción del proceso de maceración. De la misma se realizaron todas las pruebas propuestas (Fig. 4).

Pruebas cualitativas-Perfil fitoquímico.

Detección de fitoesteroles

Las pruebas fueron realizadas según lo descrito por Tiwari et al., 2011 con algunas modificaciones. Para la prueba cualitativa de compuestos esteroideales por Reacción de **Salkoswki**, una porción de extracto, aproximadamente 100 mg, se trató con 2 mL cloroformo en un tubo de ensayos y se filtró. Al filtrado se agregaron gotas de Ácido sulfúrico concentrado, se agitó y se dejó reposar.

Para el ensayo de **Liebermann-Burchard**, aproximadamente 100 mg de extracto se trataron con 2 mL cloroformo y se filtró. Al filtrado fueron adicionadas unas gotas de anhídrido acético en un tubo de ensayo. Se llevó a ebullición por 3 minutos y fueron agregadas gotas de Ácido Sulfúrico concentrado por las paredes del recipiente que contiene la reacción.

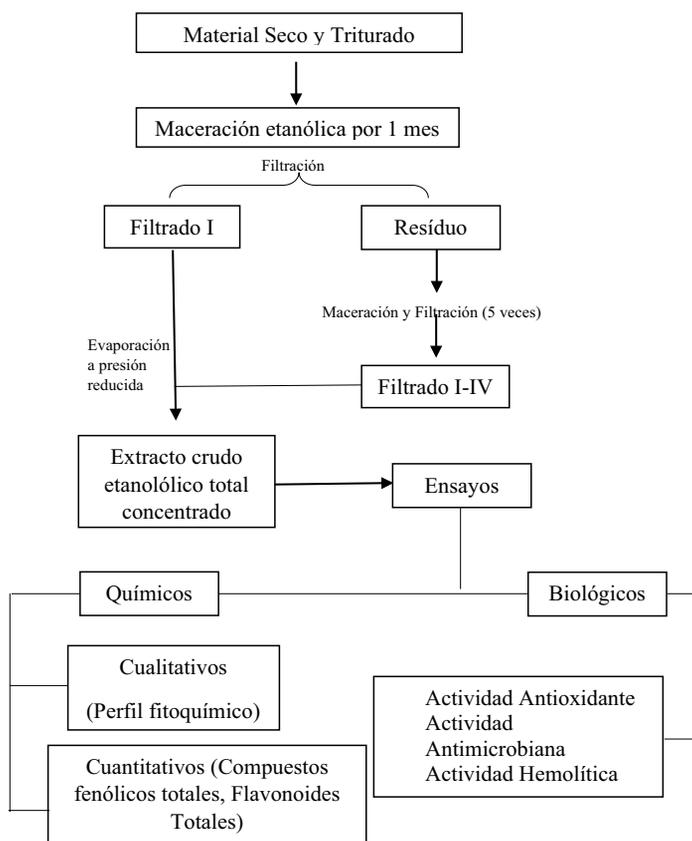


Figura 4. Esquema de trabajo Fitoquímico – Biológico.

En ambos casos, se observaron su comportamiento en cuanto a la coloración y se registraron los resultados. A fin de establecer una correcta observación, fueron realizados en paralelo ensayos de control positivo (100 mg de Colesterol) y negativo (Cloroformo p.a.) para ambas pruebas, tratando de la misma manera que las muestras (Tiwari *et al.*, 2011).

Pruebas de detección de saponinas. Ensayo de espuma/afrosimétrica

Se siguió la metodología descrita por Valencia *et al.*, (2005), donde se pesó aproximadamente 1.25 g de extracto (SC) en un tubo y se añadió 5 ml de agua destilada, se calentó en baño de agua hirviendo por 2 minutos, se agitó vigorosamente, observándose la aparición de espuma muy persistente; la persistencia en minutos de la espuma se califica de la siguiente manera: 5 - 20 min. (+); 20 - 25 min. (++); 30 - Más (+++). Como control positivo se utilizó Saponina pura y como control negativo agua destilada. Ambos controles fueron sometidos al mismo tratamiento que la muestra.

Identificación de flavonoides.

Para el **Ensayo de $AlCl_3$** , una solución metanólica del extracto (SC) de 20 mg.mL⁻¹ fue tratado con gotas del reactivo $AlCl_3$ de 100 mg.mL⁻¹ de concentración en metanol. (Ahmed *et al.*, 2015). Se utilizaron como controles solución de Rutina GR como control positivo y metanol como control negativos. 2 mL, registrándose el desarrollo de color si lo hubiere (Ahmed *et al.*, 2015).

Para la **Prueba Shinoda**, 1 g del extracto SC fue tratado con 10 mL de agua destilada. La solución fue filtrada y 1 mL de la misma fue tratada con 50 mg de Magnesio en un tubo de ensayo a las que luego se adicionó gotas de HCl concentrado a la solución. (Hossain *et al.*, 2013). Como control positivo fue utilizado 50 mg de Rutina GR y un blanco de reactivo como control negativo. Ambos fueron tratados de la misma manera que el tubo de ensayo (Hossain *et al.*, 2013).

En el **Ensayo de Rosenheim** se llevó a cabo el ensayo según lo mencionado por Bonilla *et al*

(2015) con algunas modificaciones. Se tomó una alícuota de 1 ml del extracto crudo acuoso al 2% y se le adicionó 0.5 mL de HCl(c) y se calentó durante 10 min en baño maría; se enfrió y adicionó 0.4 mL de alcohol amílico y se agitó; se dejó en reposo separándose las fases, y se observó la coloración de la fase amílica (Bonilla *et al.*, 2015).

Pruebas de detección de cumarinas

La reacción de **Baljet** fue realizada lo descrito por Bell & Krantz, (1949) con algunas modificaciones. Una muestra de extracto crudo con aproximadamente 0,1 g fue disuelta en 5 ml de Metanol. 1 mL de esta solución fue tratado en un tubo con 4 gotas de reactivo Baljet. Como control positivo se empleó una solución metanólica de Cumatetralil de 1 mg.mL⁻¹ de concentración que fue tratada de la misma manera que la muestra. Se utilizó 1 mL de Metanol como control negativo (Bell & Krantz, 1949).

Para la **Fluorescencia** se desarrolló de acuerdo a lo descrito por Kuete. Una porción de aproximadamente 0,2 g de extracto (SC) se adicionó 25 mL de Metanol en un vaso de precipitados, el cual fue calentado a ebullición durante 10 minutos. Durante la misma, el vaso fue tapado con un papel de filtro impregnado con solución de NaOH 5 % (p/v) en etanol. Una vez terminado el tiempo de ebullición el papel de filtro fue expuesto en luz UV para verificar la aparición de fluorescencia a una longitud de onda de 254 nm y 365 nm. (Bruneton, 2001)

Identificación de taninos

Se desarrolló la identificación de Taninos por la reacción de **Gelatina/Sal**, de acuerdo a lo descrito en Kasay *et al* (2013) con algunas modificaciones. Para el ensayo se tomó una alícuota de 0,2 g de extracto (SC) en 5 mL de agua destilada, al que se adicionó 2 mL de reactivo Gelatina Sal. Fueron ensayados también 2 ml de la solución de Acido Tánico 5 mg.mL⁻¹ en agua como control positivo y 2 mL de agua destilada como control negativo (Kasay *et al.*, 2013).

Para el ensayo de **$FeCl_3$** , se tomó una alícuota de 0,2 g de extracto (SC) en 5 mL de agua y se

adicionó gotas de FeCl_3 . Fueron ensayados también solución de Ácido Tánico 5 mg.mL⁻¹ como control positivo y 2 mL de agua destilada como control negativo. Ambos controles fueron tratados de la misma manera que el tubo de muestra.

En ambos casos, se registraron los resultados obtenidos (precipitado, formación de colores) (Kasay *et al.*, 2013).

Identificación de quinonas

Para la **Reacción de Borntrager** modificado, fue realizado el ensayo según lo descrito por Martínez, (2012) con algunas modificaciones. Se pesó aproximadamente 20 mg de extracto y se disolvió con 5 mL de Benceno. Se agregó posteriormente 5 mL de NH_4OH al 25 % v/v. Como control positivo se utilizó 5 mg de Fitomenadioma a la que se trató de la misma manera que la muestra y un blanco de reactivo como control negativo (Martínez, 2012).

Identificación de alcaloides.

Se llevó a cabo según lo descrito por Tiwari *et al.*, 2011 con algunas modificaciones. La muestra SC se pesó aproximadamente 0,2 g y se suspendió en 10 mL de HCl 1 %(v/v). Se filtró y se dividió en cuatro fracciones para la realización de identificación de alcaloides por Wagner, Mayer, Reineckato de Amonio y Draggendorff. A cada fracción se adicionaron los reactivos anteriormente mencionados y se registraron los resultados (formación de precipitados)

Como control negativo de cada uno de los ensayos se empleó el mismo HCl 1%(v/v) del tratamiento del extracto y como control positivo se empleó 10 mg de Morfina disueltos en 10 mL de HCl 1%(v/v), el cual se fraccionó en partes iguales y se adicionaron cada uno de los reactivos.

Reacciones cuantitativas

Compuestos fenólicos totales

El contenido de fenoles totales se determinó por el método colorimétrico de Singleton & Rossi, (1985) con algunas adaptaciones. Se preparó solución metanólica del extracto crudo de aproximadamente 1 mg.mL⁻¹. En matraz aforado de 10 mL se tomó una alícuota de la solución de extracto preparado,

se adicionaron 2000 μL de agua y 200 μL del reactivo Folin-Ciocalteu 2N (grado analítico, Merck). Se agitó y luego se dejó en reposo por 5 minutos. Posteriormente se adicionaron 1500 μL de una solución acuosa Na_2CO_3 al 20%, se aforó a 10 mL con agua. Se agitó y se dejó en reposo por 1 hora en la oscuridad. Una vez transcurrido el tiempo, se leyó la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro UV Visible.

Se empleó como blanco 1000 μL de Metanol en paralelo a fin de corregir cualquier interferencia provocada por la adición del mismo. Para la cuantificación, se compararon con soluciones patrones de Ácido Gálico, el cual se preparó primeramente una solución Stock de ácido gálico en metanol de 100 $\mu\text{g.mL}^{-1}$. A partir de esta solución se prepararon en un rango comprendido entre 0,1 a 2 $\mu\text{g.mL}^{-1}$ en diferentes matraces y se procedieron de la misma manera que en las muestras, con un volumen final de 10 mL. De los resultados se trazó una curva de calibrado para determinar la concentración equivalente de Ácido Gálico.

Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (GAE).g⁻¹; los valores se presentan como la media de los análisis realizados por triplicado \pm desviación estándar (SD) (Singleton & Rossi, 1985)

Flavonoides totales

Para la realización del ensayo de flavonoides totales se ha ensayado según lo descrito por Kumazawa *et al* (2004) con mínimas modificaciones. Se prepararon soluciones metanólicas del extracto crudo de 25 mg de SC en matraz aforado de 25 mL empleando como solvente metanol. En sendos tubos de ensayos de reacción se adicionaron 2 ml de solución de muestra y 2 ml de solución de Reactivo (solución de AlCl_3 al 2 % en metanol). Se homogeneizó cuidadosamente el contenido de cada tubo. La absorbancia de los productos de reacción fueron medidos a 367.5 nm en un espectrofotómetro. A fin de corregir el efecto matriz debido a la coloración de las muestras, se tomaron 2 mL de cada uno de las diluciones finales y se adicionaron 2 mL

de Metanol, los que fueron medidos a la misma longitud de onda de trabajo.

Para los patrones de comparación, se empleó como patrón de Trabajo una solución stock de Quercetina de $1000 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ disueltos en Metanol. A partir de esta fueron preparados en matraces soluciones que van desde 0 a $50 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ en intervalos de $10 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$. Se trataron 2 mL del contenido de cada matraz de la misma manera que las soluciones de muestra. A partir de los resultados, se preparó la curva de calibración. De la curva fueron determinadas las concentraciones equivalentes de Quercetina en cada tubo de muestra.

Los resultados se expresaron como como mg equivalentes de Quercetina. g^{-1} de extracto; los valores se presentan como la media de los análisis realizados por triplicado \pm desviación estándar (SD) (Kumazawa et al., 2004)

Actividades biológicas

Actividad antioxidante

Se llevó a cabo la determinación de actividad antioxidante mediante el método descrito por Brand-Williams *et al.* (1995) que se basa en la medida de la absorbancia del Radical DPPH• con algunas modificaciones. (Brand-Williams et al., 1995). Se preparó la solución del Extracto crudo de $2 \text{ g}\cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ en metanol. A partir de esta se realizó la dilución hasta obtener la concentración de $5 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$.

Para la reacción se tomó una alícuota de 100 μL de la solución muestra y 3,9 mL de solución de DPPH• en metanol de concentración $0.02 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$. Se homogenizó cuidadosamente y se mantuvo en oscuridad durante 1 hora. Posteriormente las lecturas de absorbancia se realizan a 517 nm en un espectrofotómetro. Se realizó una curva de calibración comprendida entre 0 a $100 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ de Ácido Ascórbico. Se tomaron 100 μL de estas soluciones y se tratan con los reactivos de la misma manera que las muestra. Los resultados se expresaron como como mg de Ácido Ascórbico. g^{-1} de Extracto Bruto; los valores se presentan como la media de los análisis realizados por triplicado \pm desviación estándar (SD).

Actividad hemolítica

Este ensayo fue llevado a cabo se acuerdo a lo establecido en Martínez *et al.*, 2013. Se utilizó sangre humana donado por un voluntario. Toda la sangre extraída fue colocada en un tubo con Heparina sódica. Antes de iniciar el ensayo, la primera etapa es la preparación de las muestras de sangre. La sangre total heparinizada se centrifugó a 3.000 rpm durante 10 min y el precipitado celular fue sometido a tres lavados consecutivos con tampón PBS pH 7,4 para obtener los glóbulos rojos. Luego, se retiró la sobrenadante con cuidado y la solución sanguínea (aproximadamente 2 mL) se resuspendió nuevamente a 100 mL (solución al 2%) con tampón PBS para su uso en el ensayo.

Para la determinación espectrofotométrica de la *Actividad hemolítica* del extracto crudo, se pesó 50 mg del extracto crudo etanólico en un matraz volumétrico de 50 mL, se agregó 5 mL de etanol absoluto, se sonicó por 30 minutos y se llevó a volumen con tampón PBS pH 7,4, siendo ésta de una concentración de $1000 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ de extracto crudo. Se etiquetaron tres tubos de ensayo de la siguiente manera: Control negativo (CN), Control positivo (CP) y Solución Muestra (SM)

Seguidamente, se tomaron 2 mL de cada una de las soluciones y finalmente se adicionaron a todos los tubos 2,0 mL de suspensión de sangre al 2%. Se homogeneizaron y se dejaron en reposo por 30 minutos. Cumplido el periodo de reposo, se centrifugaron a 3000 rpm por 10 minutos y se procedió a la medición espectrofotométrica de absorbancia de la solución sobrenadante de cada uno de los tubos a una longitud de onda de 545 nm. La actividad hemolítica fue reportada como por ciento de Hemólisis (%Hem.)

Actividad antimicrobiana. Ensayo de difusión en disco

Se procedió a la Preparación de la Solución del extracto crudo en donde se prepararon soluciones de tres concentraciones distintas utilizando Dimetilsulfoxido (DMSO) como disolvente: C₁:30 mg. mL^{-1} , C₂:25 mg. mL^{-1} , C₃: 20 mg. mL^{-1} .

Luego, se procedió a la Preparación de los

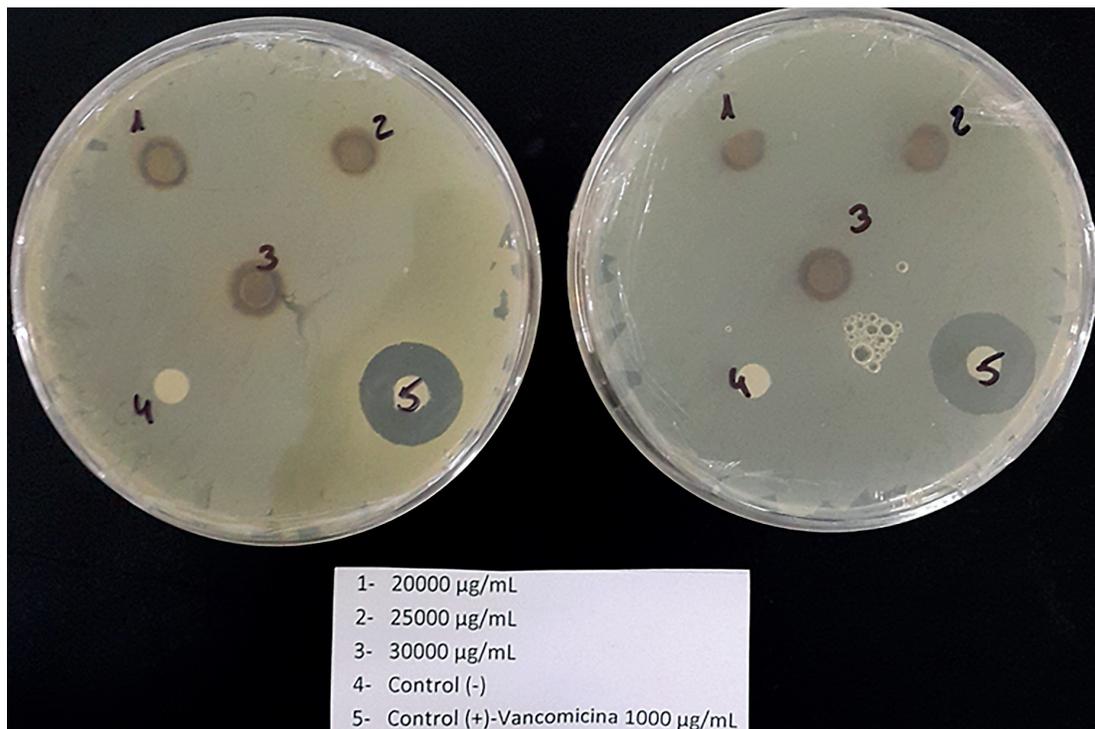


Figura 5. Distribución de los discos impregnados en placas con medio de cultivo.

Inóculos de microorganismos. Se utilizaron las siguientes bacterias Gram negativas: *Escherichia coli* (ATCC 8739), *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853), las bacterias Gram positivas: *Staphylococcus epidermidis* (ATCC 12228) *Staphylococcus aureus* (ATCC 29737), Hongo: *Candida albicans* (ATCC 10231)

Utilizando técnicas asépticas se prepararon las suspensiones bacterianas y fúngicas. Para ello se tomaron colonias aisladas de las cepas mencionadas y se suspendieron en solución salina 0,9 %; la turbidez de las mismas fue ajustada a la escala 0,5 Mc Farland correspondiente a $1,5 \cdot 10^8$ UFC.mL⁻¹. Los inóculos fueron preparados en el día del ensayo.

Por último, se inyectó la solución de los extractos en diferentes discos. Fueron preparados discos de papel de filtro cualitativo (Whatman grado 1) de 5 mm de diámetro, los cuales fueron esterilizados en autoclave por 15 minutos a 121 °C. En cada disco fueron impregnados 10µL de la solución del extracto.

También fueron preparados discos con las soluciones de control positivo de **Anfotericina B** (1 mg.mL⁻¹) para *Candida albicans*; **Meropenem** (1 mg.mL⁻¹) para *Salmonella typhimurium*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli*; **Vancomicina** (5 mg.mL⁻¹) para *Staphylococcus aureus* y *Staphylococcus epidermidis*; **Ciprofloxacina** (5 mg.mL⁻¹) para *Enterococcus faecalis* y **Dimetilsulfóxido** (DMSO) como control negativo.

Para el ensayo propiamente dicho, en cada placa se distribuyen: tres discos con las tres concentraciones mencionadas del extracto, un disco de control positivo y otro disco de control negativo en una distancia no menor de 24 mm entre los discos y a 15 mm de los bordes de las placas (Fig. 5) (Gamazo *et al.*, 2009).

Las placas se incubaron aeróbicamente a 37°C durante 24-48 horas. La actividad antibacteriana fue determinada como la media del diámetro de inhibición producido alrededor de cada disco. Todos los ensayos fueron realizados por duplicado (Gyawali & Ibrahim, 2014).

Resultados y discusión

De acuerdo a los estudios realizados, el nombre de *Schinus weinmanniifolia* Mart. ex Engl., comparado con The Plant List (2013), posee una sinonimia no oficial: *Schinus lentiscifolius* Marchand.

Extracto bruto

Se obtuvieron 316 g de extracto bruto a partir de 5 Kg de hojas (previamente secas y trituradas) equivalente a un 6,32% de rendimiento.

Análisis Químico

Pruebas cualitativas-Perfil fitoquímico.

Considerando los resultados de las pruebas cualitativas del Perfil Fitoquímico (Tabla 1), en la reacción de Liebermann-Buchard y Salkowski revelaron la presencia de compuestos esteroidales en el extracto crudo etanólico de *Schinus weinmanniifolia*. Estos resultados concuerdan con las otra especie del

mismo género, en hojas del *Schinus terebintifolius* (Costa *et al.*, 2015) y en donde han sido analizados extractos etanólicos de dicha planta, así como en extracto metanólico de las hojas del *Schinus lentiscifolius* (Aroeira) (Gehrke, 2012). Esto también se debió a la presencia de Saponinas (esteroidales) a través de la prueba de la espuma.

Además, la presencia de compuestos fenólicos (taninos principalmente) revelaron su presencia a través de las reacciones de Gelatina/Sal y FeCl_3 (taninos hidrolizables) y concuerdan con los resultados de la misma porción de la planta de especies del mismo género como el extraído de la porción soluble acuosa del *Schinus molle* (Iannacone & Alvarino, 2010) y del aceite esencial extraídos de las hojas del *Schinus polygamus* (González *et al.*, 2004).

No se fue detectada la presencia de alcaloides en ninguna de las pruebas pero ello no significa su ausencia, sólo que las pruebas de Wagner, Mayer, Dragendorff y Reineckato de amonio no lo pudieron revelar debido a la baja concentración en el extracto como en el *S. molle* (López *et al.*, 2017)

Con respecto a la presencia de flavonoides, la prueba de Shinoda (+) y la reacción del AlCl_3 (++) han revelado la presencia de flavonoides, sin embargo, las pruebas de Baljet y fluorescencia no han revelado la presencia de cumarinas y compuestos relacionados. Este resultado fue esperado debido a la amplia distribución de flavonoides (Taiz & Zeiger, 2010) en la naturaleza y la distribución restringida de cumarinas. La presencia de flavonoides en el extracto de hojas del *S. weinmanniifolia* consonancia con otros estudios de especies relacionadas en las que también ya fueron descritos flavonoides encontrados en extracto metanólico de hojas del *Schinus longifolius* (Agudelo *et al.*, 2013), además en hojas y frutos de la especie *Schinus molle* (López *et al.*, 2017).

Por la gran variedad de especies presentes en el género, y de acuerdo a los datos no se han reportado la presencia de cumarinas, quinonas, sesquiterpen-lactonas, en contrapartida se han detectado gran cantidad de derivados terpenoides, especialmente en el aceite esencial extraído de las hojas del *S.*

Tabla 1. Resumen de Ensayos Cualitativos.

Ensayo	Metabolito Secundario	Resultado
Liebermann-Buchard	Fitoesteroles	++
Salkowski		++
Prueba de la Espuma	Saponinas	+++
Prueba Afrosimétrica		+++
AlCl_3	Flavonoides	++
Shinoda		+
Rosenheim		-
Baljet	Cumarinas	-
Fluorescencia		-
Precipitación de la Gelatina	Taninos	+++
FeCl_3		+++ (Azul)
Borntrager	Quinonas	++
Wagner	Alcaloides	-
Mayer		-
Dragendorff		-
Reineckato de Amonio		-

molle, además del *S. terebinthifolius*, *S. polygamus* y *S. longifolius*, además de compuestos con núcleo esteroidales (Gehrke, 2012)

Compuestos fenólicos totales

Se muestra los resultados obtenidos de la cuantificación de Compuestos Fenólicos Totales calculados a partir de la ecuación $A=0.0950[\text{Conc}]+0.0114$, arrojando el valor de 72.1 ± 2.06 mg GAE.g⁻¹

Análisis similares en especies del mismo género como *S. longifolius* demostraron la presencia de $206 \pm 15,1$ mg Ac. Gálico.g⁻¹ de extracto metanólico de las hojas (Agudelo *et al.*, 2013) y 228 de Ac. Gálico.g⁻¹ en el extracto etanólico de hojas del *S. terebinthifolius* obtenido por Soxhlet (Costa *et al.*, 2015). Por los diferentes solventes de extracción y técnicas de macerado, estos resultados son difíciles de comparar. Generalmente se observa mayor cantidad de compuestos polifenólicos en los extractos etanólicos (Tiwari *et al.*, 2011). El resultado sugirió que de acuerdo a las pruebas cualitativas de taninos y flavonoides fueron concordantes entre si.

Flavonoides totales

La cuantificación de compuestos con núcleo que respondieron a los flavonoides arrojó por resultado (expresado en mg Quercetina.g⁻¹ extracto) $40,7 \pm 6,40$ en el Extracto crudo etanólico (SC) a partir de la ecuación $A=0.00685[\text{Conc}]-0.00462$. Otros estudios en hojas de especies relacionadas revelaron la presencia de flavonoides en el extracto de etanólico de hojas de *S. longifolius* con un valor de $1,11 \pm 0,10$ mg rutina.g⁻¹ de extracto etanólico; comparando numéricamente se observó que el extracto crudo etanólico de la especie en estudio se mostró muy por encima del valor reportado por una especie del mismo género, pero por debajo de 69.67 ± 3.34 mg Quercetina.g⁻¹ de extracto etanólico reportado por la especie *S. terebinthifolius* (Uliana *et al.*, 2016).

Actividades biológicas

Prueba de actividad antioxidante

La cantidad de compuestos antioxidantes viene expresado como los mg de Ácido por gramo de

extracto calculados a partir de una curva de calibración con patrones de referencia de concentración conocida (Quercetina USP) vs la absorbancia de las mismas ($A=-0.00314[\text{Conc}]+0.4498$), en donde mostró valor de $0,509 \pm 0,0224$ mg Ácido Ascórbico.g⁻¹ para el Extracto Crudo etanólico (SC).

Considerando la actividad expresada en % de Actividad Antioxidante tenemos que para SC fue 39,9% (calculado a partir de la ecuación $A=-0,00134[\text{Conc}]+0.4184$ con un IC₅₀ de $0,154$ mg.mL⁻¹) comparando con el IC₅₀ reportado de 19,4 % en *Schinus terebinthifolius* (da Silva *et al.*, 2017) es elevado pero menor que en los aceites esenciales extraídos del *Schinus molle* con un valor de 90 ± 1.23 %.(Salem *et al.*, 2016), el cual fue considerado como especie estabilizadoras de radicales DPPH y por consiguiente su marcado efecto.

Con estos resultados, el *S. weinmannifolia* se comparan con el *S. molle* (Hosni *et al.*, 2011) y el *S. lentifolius* (Gehrke, 2012), los cuales son las especies de mayor actividad antioxidante.

Prueba de actividad antimicrobiana

En función a la escala de actividad antimicrobiana se tiene los siguientes criterios: < 9 mm, inactivo; 9-12 mm, parcialmente activo; 13-18 mm, activo; >18 mm, muy activo (De Almeida *et al.*, 2000). A la luz de los resultados, se han observado que por la técnica de difusión en disco, la actividad del extracto crudo etanólico (SC) (Tabla 2) ensayado sobre cepas de *Escherichia coli*, *Salmonella typhimorium* arrojaron como resultado que las mismas son parcialmente activas a concentraciones de 30 mg.mL⁻¹, parcialmente activas contra *Enterococcus faecalis* y *Pseudomonas aeruginosa* a una concentración de 20 mg.mL⁻¹, así como parcialmente activo contra *Candida albicans* a una concentración de 25 mg.mL⁻¹ e inactivo contra *Staphylococcus epidermidis* y *Staphylococcus aureus*.

El resultado de este ensayo demostró que los compuestos con posibles actividades antimicrobianas se encuentran en SC pero sólo a elevadas concentraciones. Estos resultados se contrastan con los reportados por extractos acuoso/etanólico

Tabla 2. Resultados de ensayo de Disco difusión en SC.

Microorganismo	Halo de Inhibición (mm) 20 mg.mL ⁻¹	Halo de Inhibición (mm) 25 mg.mL ⁻¹	Halo de Inhibición (mm) 30 mg.mL ⁻¹	Halo de Inhibición (mm) Control Positivo
<i>Escherichia coli</i>	8	8	10	34
<i>Salmonella typhimurium</i>	6	8	9	34
<i>Enterococcus faecalis</i>	9	10	11	44
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	8	8	10	32
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	7	8	8	21
<i>Staphylococcus aureus</i>	7	8	8	21
<i>Candida albicans</i>	7	10	8	22

de hojas de la especie *Schinus Terebinthifolius*, en donde mostró un elevado halo de inhibición sobre *S. aureus* (27,8 mm), además de *E. coli* (23,6 mm) y *C. albicans* (25,3 mm) (Martínez *et al.*, 1996).

Actividades antimicrobianas también fueron observados en el aceite esencial del *Schinus polygamus*, dando resultados positivos contra las bacterias *E.coli*, *K. pneumoniae*, *S. aviatum*, *S. aeruginosa* (Erazo *et al.*, 2006).

Una de las especies más estudiadas del género es el *Schinus molle*, que tanto en extracto de frutos, como en el extracto crudo de hojas y más aún en el aceite esencial han demostrado ser efectivos contra diferentes bacterias (Simionatto *et al.*, 2011). Considerando además la edad gestacional de la planta, se ha reportado que, mientras más adulta es la planta, mayor es su actividad contra las mismas cepas objetos de estudio (Hosni *et al.*, 2011).

Existen disidencias en cuanto a las actividades frente a los diversos microorganismos, los mismos, al igual que las divergencias en la actividad antioxidante podrían ser atribuidas a la metodología de extracción aplicada para el estudio, así como de la muestra extraída (aceites esenciales) o por la diferente composición de metabolitos activos de acuerdo a la localidad, ya que se sabe que diferentes partes de la planta varían su composición de metabolitos de acuerdo al ambiente en que se encuentran (Sepúlveda *et al.*, 2003).

Actividad hemolítica

La propiedad hemolítica de moléculas ha sido el fundamento determinante en el desarrollo de diferentes potenciales terapéuticos; la cual se relaciona directamente con la lisis con otras actividades biológicas como la antitumoral, adyuvante y anti-inflamatoria, los que han tenido buenos resultados sobre las membranas celulares (Wang *et al.*, 2007).

En el extracto crudo etanólico analizado de la especie vegetal en estudio se ha mostrado un IC₅₀ de 179 µg.mL⁻¹ y una actividad del 55,9 % (Tabla 3) frente a un patrón de referencia de comprobada actividad hemolítica como el Dodecilsulfonato de sodio (SDS).

Tabla 3. Tabla de resultados – Actividad Hemolítica de SC.

Concentración de Extracto crudo (µg.mL ⁻¹)	Abs
0	0.045
100	0.276
200	1.268
500	3.474
Pendiente	0.00718
Intercepto	-0.1708
IC ₅₀	179 µg.mL ⁻¹
Actividad Hemolítica	55.9 %

Conclusión

La especie fue identificada como *Schinus weinmanniifolia* Mart. ex Engl. Se obtuvo un rendimiento de extracción del 6,32 g.100 g⁻¹ de extracto etanólico proveniente de las hojas de la especie vegetal en estudio, obtenido por la técnica de maceración exhaustiva.

El Perfil Fitoquímico reveló la presencia de flavonoides, taninos y compuestos esteroidales y la ausencia de los demás grupos de compuestos. Se cuantificaron la cantidad de fenoles totales 72.1 mg de Ac. Galico.g⁻¹ de Extracto Crudo (SC) y la de flavonoides totales 40,7 mg de Quercetina.g⁻¹.

El extracto bruto etanólico (SC) mostró que fue parcialmente activos contra cepas de *E. coli*, *S. typhimurium*, *E. faecalis*, *P. aeruginosa*, *C. albicans* en placa. La actividad antioxidante fue medida en porcentaje de inhibición dando como resultado SC fue 39,9%, para SH fue 22,9% y la actividad hemolítica en SC se observó que presentó un valor de IC₅₀ de 179 µg.mL⁻¹ y una actividad del 55,9 %, arrojando resultados prometedores para su uso en líneas celulares tumorales.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Agudelo, I., Wagner, M., Gurni, A. & Ricco, R. (2013). Dinámica de polifenoles y estudio anatomo-histoquímico en *Schinus longifolius* (Lindl.) Sp. (Anacardiaceae) en respuesta a la infección por *Calophya mammifex* (Hemiptera - Calophyidae). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 12(2): 162–175.
- Ahmed, D., Khan, M. & Saeed, R. (2015). Comparative Analysis of Phenolics, Flavonoids, and Antioxidant and Antibacterial Potential of Methanolic, Hexanic and Aqueous Extracts from *Adiantum caudatum* Leaves. *Antioxidants*, 4(2): 394–409.
- Bacchi, E.M. (1986). Ação anti-úlceras e cicatrizante de algumas plantas brasileiras. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 1(1): 93–100.
- Bell, F. & Krantz, J. (1949). Digitalis. VIII. The Baljet Reaction, Digitoxin and Digitoxigenin. *Journal of the American Pharmaceutical Association (Scientific Ed.)*, 38(2): 107–109.
- Bonilla, N., Varón, F.A. & Garzón, L.P. (2015). Extracción de pigmentos colorantes tipo flavonoides, flor del pomo (*Syzygium jambos*). Zona Verde del IEAR. Florencia Caquetá. *Amazonia Investiga*, 3(2): 34–43.
- Branco Neto, M.L.C., Ribas Filho, J.M., Malafaia, O., Oliveira Filho, M.A., Czeckzo, N.G., Aoki, S. & Aguiar, L.R.F. (2006). Avaliação do extrato hidroalcoólico de Aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) no processo de cicatrização de feridas em pele de ratos. *Acta Cirúrgica Brasileira*, 21(Sup. 2): 17–22.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E. & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1): 25–30.
- Bruneton, J. (2001). *Farmacognosia, Fitoquímica, Plantas Medicinales*. (2a Ed.). Zaragoza: Editorial Acribia. xvi + 1099 pp.
- Carlini, E.A., Duarte-Almeida, J., Rodrigues, E. & Tabach, R. (2010). Antiulcer effect of the pepper trees *Schinus terebinthifolius* Raddi (aroeira-da-praia) and *Myracrodruon urundeuva* Allemão (aroeira-do-sertão). *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 20(2): 140–146.
- Costa, C.O.S., Ribeiro, P., Loureiro, M., Simões, R.C., Castro, R.D. & Fernandez, L.G. (2015). Phytochemical screening, antioxidant and antibacterial activities of extracts. *Pharmacognosy Magazine*, 11(43): 607–614.
- da Silva, M., Iriguchi, E., Kassuya, C., Vieira, M.C., Foglio, M.A., de Carvalho, J.E. & Formaggio, A. (2017). *Schinus terebinthifolius*: Phenolic constituents and in vitro antioxidant, antip-

- roliferative and in vivo anti-inflammatory activities. *Brazilian Journal of Pharmacognosy*, 27(4): 445–452.
- De Almeida, T., Fonseca, A., Brandão, M., Mesquita, T., Smânia, E., Smânia, A. & Zani, C. (2000). Biological Screening of Brazilian Medicinal Plants. *Memorias Do Instituto Oswaldo Cruz*, 95(3): 367–373.
- Díaz, C. & Quesada, S. (2008). Chemical composition of *Schinus molle* essential oil and its cytotoxic activity on tumour cell lines. *Natural Product Research*, 22(17): 1521–1534.
- Erazo, S., Delporte, C., Negrete, R., García, R., Zaldívar, M., Iturra, G. & Backhouse, N. (2006). Constituents and biological activities of *Schinus polygamus*. *Journal of Ethnopharmacology*, 107(3): 395–400.
- Ferrero, A., Minetti, A., Bras, C. & Zanetti, N. (2007). Acute and subacute toxicity evaluation of ethanolic extract from fruits of *Schinus molle* in rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 113(3): 441–447.
- Gamazo, C., López-Goñi, I., & Díaz, R. (2009). *Manual Práctico de Microbiología*. (3ª Ed.). Barcelona: Masson. xiii + 231 pp.
- Gehrke, I. (2012). *Estudo fitoquímico e biológico das espécies Schinus lentiscifolius, Schinus terebinthifolius, Schinus molle e Schinus polygamus (Anacardiaceae) DO RS*. Doctoral Thesis. Santa María: Universidad Federal de Santa María. 184 pp.
- Gehrke, I.T.S., Neto, A.T., Pedroso, M., Mostardeiro, C.P., Da Cruz, I.B.M., Silva, U.F., Ilha, V., Dalcol, I.I. & Morel, A.F. (2013). Antimicrobial activity of *Schinus lentiscifolius* (Anacardiaceae). *Journal of Ethnopharmacology*, 148(2): 486–491.
- González, S., Guerra, P.E., Bottaro, H., Molares, S., Demo, M.S., Oliva, M.M., Zunino, M.P. & Zygadlo, J.A. (2004). Aromatic plants from Patagonia. Part I. Antimicrobial activity and chemical composition of *Schinus polygamus* (Cav.) Cabrera essential oil. *Flavour and Fragrance Journal*, 19(1): 36–39.
- Gyawali, R., & Ibrahim, S. A. (2014). Natural products as antimicrobial agents. *Food Control*, 46: 412–429.
- Hosni, K., Jemli, M., Dziri, S., M'rabet, Y., Ennigrou, A., Sghaier, A., Casabianca, H., Vulliet, E., Nadia Ben Brahim, N.B. & Sebei, H. (2011). Changes in phytochemical, antimicrobial and free radical scavenging activities of the Peruvian pepper tree (*Schinus molle* L.) as influenced by fruit maturation. *Industrial Crops and Products*, 34(3): 1622–1628.
- Hossain, M.A., AL-Raqmi, K. A.S., AL-Mijizy, Z.H., Weli, A.M. & Al-Riyami, Q. (2013). Study of total phenol, flavonoids contents and phytochemical screening of various leaves crude extracts of locally grown *Thymus vulgaris*. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 3(9): 705–710.
- Iannacone, J. & Alvarino, L. (2010). Toxicidad de *schinus molle* L. (Anacardiaceae) a cuatro controladores biológicos de plagas agrícolas en el Perú. *Acta Zoológica Mexicana*, 26(3): 603–615.
- Jarbas, P.M., Moellerke, P., Bordignon, S., Schenkel, E. & Roehle, P. (2004). Antiviral activity of Brazilian plant extracts. *Acta Farmaceutica Bonaerense*, 23(2): 183–186.
- Kumazawa, S., Hamasaka, T. & Nakayama, T. (2004). Antioxidant activity of propolis of various geographic origins. *Food Chemistry*, 84(3): 329–339.
- López, I.C., Rivera, V., Yáñez, Á., Artieda, J. & Villacres, G. (2017). Evaluación de la actividad insecticida de *Schinus molle* sobre *Premnotrypes vorax* en papa. *Agronomía Costarricense*, 41(2): 93–101.
- Martínez, M.J., Alonso González, N. & Betancourt Badell, J. (2000). Actividad antimicrobiana del *Schinus terebinthifolius* Raddi (copal). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 1(3): 37–39.
- Martínez, M., Mancuello, C., Pereira, C., González, F., Prieto, R., Álvarez, S. & Benítez, B. (2013). Estudio espectrofotométrico de la actividad hemolítica del extracto crudo de *Phoradendron bathyoryctum* Eichler so-

- bre eritrocitos humanos. *Steviana*, 5(12): 114–121.
- Perrotta, V. G. & Arambarri, A. M. (2004). *Schinus longifolia* var. *longifolia* (Anacardiaceae): Anatomía foliar y caulinar. *Acta Farmaceutica Bonaerense*, 23(2): 142–147.
- Piccinelli, A.C., Santos, J.A., Konkiewitz, E.C., Oesterreich, S.A., Formagio, A.S.N., Croda, J., Ziff, E.B. & Kassuya, C.A.L. (2014). Antihyperalgesic and antidepressive actions of (R)-(+)-limonene, α -phellandrene, and essential oil from *Schinus terebinthifolius* fruits in a neuropathic pain model. *Nutritional Neuroscience*, 18(5): 217–224.
- Salem, M., Zayed, M., Ali, H. & Abd El-Kareem, M. (2016). Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities of extracts from *Schinus molle* wood branch growing in Egypt. *Journal of Wood Science*, 62(6): 548–561.
- Sepúlveda, G., Porta, H. & Rocha, M. (2003). La participación de los metabolitos secundarios en la defensa de las plantas. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 21(3): 355–363.
- Simionatto, E., Chagas, M.O., Peres, M.T.L.P., Hess, S.C., Silva, C.B., Ré-Poppi, N., Gebara, S.S., Corsino, J., Morel, A.F., Stuker, C.Z., Matos, M.F.C. & Carvalho, J.E. (2011). Chemical composition and biological activities of leaves essential oil from *Schinus molle* (Anacardiaceae). *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 14(5): 590–599.
- Singleton, V. & Rossi, J. (1985). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 48(16): 18–42.
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. (5th Ed.). Sunderland: Sinauer Associates. 782 pp.
- The Plant List. (2013). *The Plant List*. Version 1.1. [Consulted: 29/01/2019]. <<http://www.theplantlist.org/>>.
- Tiwari, P., Kumar, B., Mandeep, K., Kaur, G. & Kaur, H. (2011). Phytochemical screening and Extraction: A Review. *Internationale Pharmaceutica Scientia*, 1(1): 98–106.
- Missouri Botanical Garden. (2018). *Tropicos*. V. 3.4.0. Missouri Botanical Garden. [Consulted: 29/01/2019]. <<https://www.tropicos.org/home>>.
- Uliana, M.P., Fronza, M., Silva, A.G., Vargas, T.S., Andrade, T.U. & Scherer, R. (2016). Composition and biological activity of Brazilian rose pepper (*Schinus terebinthifolius* Raddi) leaves. *Industrial Crops and Products*, 83: 235–240.
- Valencia, E., McDonald, D., Cuyos, M. & Dueñas, R. (2005). Extracción, identificación y evaluación de saponinas en *Agaricus bisporus*. *Biotempo*, 5: 31–36.
- Wang, Y., Zhang, Y., Zhu, Z., Zhu, S., Li, Y., Li, M. & Yu, B. (2007). Exploration of the correlation between the structure, hemolytic activity, and cytotoxicity of steroid saponins. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 15(7): 2528–2532.

Impacto del COVID-19 en las MIPYMES paraguayas: una perspectiva desde el tamaño, sector económico y antigüedad de la empresa

Impact of COVID-19 on Paraguayan SMEs: A Perspective from Company Size, Economic Sector, and Age

Edgar A. Sánchez Báez^{1,*}, José M. Román¹, María Paz Brassel¹ & Diego Sebastián Parra¹

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Tecnología de Producción, San Lorenzo, Paraguay.

*Autor correspondiente: Email: esanchez@rec.una.py.

Resumen: Los efectos de la pandemia en las micro, pequeñas y medianas empresas (mipymes) han resultado ser graves en la mayoría de las economías del mundo. Así, el objetivo de este estudio es estimar el impacto de la crisis generada por la pandemia del Covid-19 en el empleo, en las ventas y en las relaciones con proveedores y clientes en las mipymes paraguayas. Para lograr el esto, se realizó una encuesta a 227 propietarios y gerentes de mipymes de Capital y Departamento Central, en los sectores de industria manufacturera, servicio y otros (comercio, construcción), durante los meses de febrero a abril de 2021. Se ha realizado un análisis cuantitativo de datos aplicando la prueba Chi cuadrada de Pearson y el análisis de varianza. Los resultados obtenidos señalan que las pequeñas y medianas empresas han sido muy afectadas por el endurecimiento en los plazos de pagos por parte de los proveedores. Asimismo, los plazos de pagos de los clientes han repercutido negativamente de forma más contundente en las medianas empresas. También se observa que en el 2020 en comparación con el 2019, hubo importante disminución del empleo sin diferenciar tamaño, sector o antigüedad. Sin embargo, se evidencia que las empresas jóvenes han tenido mayor capacidad para mantener los empleos. Asimismo, el saldo de evolución de las ventas ha sido en general negativo en las mipymes, pero los resultados muestran que durante la pandemia, el sector de industria manufacturera ha tenido mayor capacidad para mantener las ventas en comparación de los otros sectores.

Palabras claves: *impacto, empleo, ventas, mipymes, Covid-19.*

Abstract: The effects of the pandemic on micro, small and medium-sized enterprises (MSMEs) have proven to be severe in most economies of the world. Thus, the objective of this study is to estimate the impact of the crisis generated by the Covid-19 pandemic on employment, sales and relations with suppliers and clients in Paraguayan MSMEs. To achieve this, a survey was conducted among 227 owners and managers of MSMEs in the Capital and Central Department, in the manufacturing industry, service and other sectors (commerce, construction), during the months of February to April 2021. A quantitative analysis of data was carried out by applying Pearson's Chi-square test and analysis of variance. The results obtained indicate that small and medium-sized companies have been greatly affected by the tightening of payment terms by suppliers. Likewise, customer payment terms have had a negative impact on medium-sized companies. It is also observed that in 2020 compared to 2019, there was a significant decrease in employment without differentiating size, sector or years in the market. However, it is evident that young companies have had a greater capacity to maintain employment. Likewise, the balance of sales evolution has been generally negative in MSMEs, but the results show that during the pandemic, the manufacturing industry sector has had a greater capacity to maintain sales compared to other sectors.

Key words: *impact, employment, sales, MSMEs, COVID-19.*

Introducción

La pandemia del Covid-19 ha afectado a todas las empresas y especialmente a las mipymes por las limitaciones que presentan este tipo de empresas para enfrentar las crisis. Las crisis son complejas y sus efectos se sienten no solo de inmediato, sino también a lo largo del tiempo (Ansell & Boin, 2019).

Como consecuencia de esto, tanto los gobiernos, organizaciones y empresas han puesto en marcha acciones para superar los desafíos de la crisis generada por la pandemia (Alves et al., 2020; Gregurec et al., 2021). En este sentido, las limitaciones y vulnerabilidades que presentan las mipymes ante las crisis supone que el impacto ocasionado en

Recibido: 28/02/2023 Aceptado: 14/04/2023



estas organizaciones sea mayor que en las grandes empresas (Alves et al., 2020).

Así, los efectos de la pandemia en las mipymes han resultado ser graves en la mayoría de los casos, tanto en países desarrollados como en economías de menor desarrollo (Nicola et al., 2020, Sharma et al., 2020). Si bien el efecto negativo se ha resentido en todos los sectores productivos, en algunos sectores específicos como los restaurantes, centros comerciales y de actividades de ocio, el efecto ha sido más contundente por las restricciones de movilidad de las personas, llegando incluso al cierre definitivo en algunos casos (Baum & Hai, 2020). En esta línea, también la restricción de confinamiento de las personas ha provocado un aumento significativo del desempleo, lo que acentuó aún más la desigualdad social (Blustein et al., 2020; O'Connor et al., 2020).

Los resultados de algunos estudios señalan que la mayoría de las operaciones de las mipymes que han sido gravemente afectadas durante la pandemia, no estaban lo suficientemente preparadas para enfrentar esta situación. Así, los problemas más frecuentes a las que se han enfrentado estas empresas se ha relacionado principalmente a la disminución de la demanda y la consecuente reducción en las ventas y en los ingresos, la interrupción en la cadena de suministro o el endurecimiento de las condiciones por parte de los proveedores, así como la dificultad para acceso a créditos acorde a las necesidades de una crisis (Donthu & Gustafsson, 2020; Shafi et al., 2020).

Para enfrentar los efectos de la crisis, ha sido necesario que las mipymes lleven adelante ciertas reestructuraciones en el modelo de negocio tradicional, como por ejemplo cambios en la modalidad para hacer el trabajo (Korankye, 2020; Chirume & Kaseke, 2020; Bargados, 2021; Albonico et al., 2020). Así, la pandemia de Covid-19 ha dado lugar a un entorno cambiante que plantea muchos desafíos que exigen soluciones innovadoras, lo que ha dado lugar a un panorama de innovación cambiante (Ebersberger & Kuckertz, 2021). Esto ha llevado a muchas organizaciones a tomarse la innovación mucho más en serio y ha sido fundamental para la supervivencia de las mipymes.

Investigaciones realizadas hablan de los importantes efectos que las limitaciones impuestas por los gobiernos para mitigar la propagación del virus han tenido en las mipymes; los bloqueos parciales o totales en las operaciones de estas empresas ha provocado en muchos casos el cierre definitivo de muchos emprendimientos, el cambio de rubro o el cambio del modelo de negocio (Burhan Ismael et al., 2021). Esta situación se ha agravado en los países en vías de desarrollo como Paraguay, en el que los respectivos Gobiernos han puesto en marcha estrategias que al parecer tuvieron muy poco efecto en la mitigación de los ingresos de las mipymes

Este estudio se enfoca en valorar el impacto económico de la crisis generada por el Covid-19 en las mipymes de Paraguay. A partir de una investigación, este artículo aporta información relevante sobre el impacto ocasionado por la pandemia sobre las relaciones con clientes y proveedores, el empleo y las ventas en las mipymes de Asunción y el Departamento Central. Buscando obtener una visión integral de las empresas participantes de manera a poner en manifiesto sus virtudes o desequilibrios, los resultados de esta investigación podrían ser útiles como marco de referencia para la adopción de medidas futuras que permitan potenciar las virtudes y ajustar los desequilibrios de dichas empresas.

Las relaciones con proveedores y clientes en tiempos de pandemia

Es de conocimiento que las relaciones con los clientes y especialmente los retrasos por parte de proveedores han generado situaciones difíciles para las mipymes de todo el mundo durante la pandemia Covid-19, especialmente en nuestro país por la difícil situación geográfica que presenta, en materia de logística internacional. Así, durante la pandemia las relaciones con proveedores y clientes han sido afectadas negativamente por diversos factores. Estas dificultades en las relaciones en la cadena han impulsado algunos cambios por parte de las pymes, y esto ha sido clave para la capacidad de estas empresas para prosperar durante la pandemia (Marconatto et al., 2021; Todo & Inoue, 2021).

En el mismo sentido, Marconatto et al., (2021)

mencionan que las pymes que sobrevivieron durante la pandemia, son aquellas que dividieron sus ventas entre muchos clientes. Así también, Twahirwa et al., (2021), exponen que los principales desafíos que enfrentan las mipymes debido al Covid-19, incluyen la incapacidad de los clientes para pagar las facturas y la dificultad para acceder a los insumos tanto a nivel nacional e internacional. Algunos estudios recientes dejan por sentado que la crisis estructural provocada por la pandemia del Covid-19, conducirán necesariamente a las pymes a una nueva reestructuración y cambios de las relaciones tanto con proveedores y clientes (Nevskaya, 2020; Corchuelo Martínez-Azúa et al., 2021).

El empleo en el contexto de pandemia

De acuerdo al informe de CEPAL sobre el impacto de la pandemia del Covid-19 y los efectos económicos y sociales para América Latina y el Caribe, se estima que casi el 99% de las empresas en América Latina son mipymes y por lo tanto constituyen la mayoría de las empresas en todos los sectores económicos, siendo los empleados de estas empresas altamente vulnerables a los efectos de la crisis provocada por la pandemia. Asimismo, el cierre temporal de actividades y otras medidas preventivas implican una gran reducción en los ingresos generados por las mipymes y ponen en riesgo la supervivencia de este tipo de empresas que difícilmente podrían mantener los empleos (CEPAL, 2020).

Algunos estudios realizados en tiempos de pandemia hablan de la capacidad de resiliencia de las mipymes para adaptarse a la situación y cambiar rápidamente su gestión de manera a tratar de mantener los empleos durante la crisis (Hrivnák et al., 2021). Estas ventajas, según Hrivnák et al., (2021) incluyen entre otras, la capacidad de absorber nuevos conocimientos, la capacidad de buscar nuevas oportunidades, la tendencia a producir, y la capacidad de estar enfocado en la tecnología y en las actividades nuevas que van surgiendo.

A pesar de las capacidades de adaptación mencionadas, es también importante exponer que algunos sectores han presentado ciertas ventajas o incluso expansión respecto al empleo en esta pan-

demia, sobre todo aquellas empresas que guarda relación con el consumo básico y con el sector farmacéutico. Sin embargo, de acuerdo a Veugelers et al., (2019), estas capacidades de mantenimiento y adaptación positiva de empleo también está muy relacionado con el tamaño de las empresas e incluso podría influir la antigüedad de las mismas. Así, a mayor tamaño las empresas tendrían mejores posibilidades de reestructurar o readaptar empleo, por otro lado, cuando son de menor tamaño (micros y pequeñas empresas) tiende a afectar el empleo negativamente en mayor medida.

En este sentido, de acuerdo al estudio de García Pérez de Lema et al., (2021), algunos países como España experimentaron una marcada reducción de la fuerza laboral de las pymes cercano al 34%, durante el primer año de la crisis Covid-19. Asimismo, al considerar la evolución de 2020 con relación a 2019, los datos del estudio muestran que el 25,2% de las pymes redujo el empleo, un 62,5% lo mantuvo y un 12,3% lo aumentó. Las empresas que tuvieron un peor comportamiento en cuanto a la evolución del empleo en 2020 fueron las microempresas y pequeñas empresas. En el caso de las medianas empresas este comportamiento fue positivo.

En la misma línea pero a nivel regional, según Ernst & López Mourelo (2021) al inicio de la crisis del Covid-19, las pymes argentinas han sido afectadas en un 33% con la pérdida de empleo, y esta situación ha ido empeorando en la medida que se agudizaron también los confinamientos obligatorios. En este punto, vale la pena mencionar que sectores de hotelorías y los restaurantes han sido más fuertemente afectadas, y este sentido las mujeres han sido las más afectadas, teniendo en cuenta los sectores mencionados en Argentina aglutinan a un 44% de empleo femenino. Otro estudio similar pero con muestra de pymes de Chile y México, demostraron que el 53% de las empresas estudiadas han tenido que reducir su plantilla de empleados durante la crisis sanitaria (Contreras et al., 2021).

En Paraguay, al igual que en la mayoría de los países, las medidas de mitigación adoptadas ante el avance del virus, ocasionó un efecto inmediato

en las operaciones normales de las mipymes, que vieron reducida su capacidad de generar ingresos de manera abrupta, con lo cual, las posibilidades reales de mantener los empleos y el propio negocio en funcionamiento dependía en gran medida del tiempo de implementación de las medidas restrictivas y de los programas de asistencia que pudiera ofrecer el gobierno (Ferrer Dávalos, 2021). Durante la pandemia se han visto incrementadas acciones y comportamientos por parte de algunos empleadores con relación a los contratos de trabajo con condiciones reducidas en cuanto a pagos, horarios y otros aspectos, lo que hizo que muchos trabajadores experimenten una repentina reducción de sus ingresos y la consecuente limitación en su capacidad de pago y de consumo.

Las ventas en las mipymes durante la pandemia

Otra de la variable clave que ha sido afectado negativamente en las mipymes durante la pandemia guarda relación con las ventas. Esto se ha dado principalmente porque la crisis sanitaria ha influido de manera profunda en los patrones de consumo de las personas así como en la reconfiguración comercial (Valdes & Rogel, 2020). En este sentido, en todo el mundo y en especial en los países en vías de desarrollo, estas empresas han tenido que adaptarse a los cambios generados por la pandemia respecto a la caída de las ventas, entre lo que destaca el incremento de la presencia digital como nuevos instrumentos para el comercio.

Al respecto, a nivel global se ha reportado disminución de cliente en las empresas y en otros casos se realizaron cierres temporales especialmente en las mipymes (Heredia et al., 2020). En este aspecto, vale la pena mencionar que en algunos casos se interrumpieron procesos gubernamentales de licitaciones y concursos de obras, lo que detuvo las ventas de empresas que tienen como principal cliente al sector público. Así también, de acuerdo a García Pérez de Lema et al., (2021), la crisis originada por la Covid-19 ha provocado la caída de los ingresos en muchas empresas en España. El 52,6% de las empresas encuestadas estima que ha visto reducidas sus ventas en 2020 con relación

a las registradas en 2019 como consecuencia de la crisis, mientras que el 26,1% consiguió mantenerlas y un 21,3% las aumentó. La mencionada investigación expuso que la intensidad de la caída de las ventas está relacionado en cierta forma con el tamaño de las empresas y el sector económico al cual pertenece.

En el contexto regional, al analizar la situación de Ecuador, Cueva-Rivera & Erazo-Álvarez (2021), señalan que 73,1% de las mipymes que han participado de su estudio, presentan una disminución en las ventas con relación al 2019; un 17,9% refieren que han mantenido su volumen de ventas; mientras que sólo el 9,3% ha conseguido aumentar sus ventas a pesar de la crisis generada por el Covid-19. Según Piper & Sanfilippo (2021) en Panamá, solamente el 5,9% de las mipymes han reportado aumento en sus ventas durante la crisis, y el 86% señalan que han sufrido una reducción en sus ventas. Se observan situaciones similares en la mayor parte de los países de la región.

Materiales y metodos

Para alcanzar el objetivo propuesto se realizó la recolección de datos a partir de una encuesta en la modalidad online, y que fue distribuida a través de correo electrónico durante los meses de febrero, marzo y abril de 2021 a los propietarios y gerentes de mipymes de Asunción (capital) y Departamento Central. Los participantes corresponden a empresas de los sectores industrial manufacturera, servicios y otros (que incluye a comercio y construcción), los cuales fueron agrupados por tamaños en micro, pequeñas y medianas empresas (de acuerdo a la clasificación establecida en la Ley 4.457/2012). Se obtuvo una muestra de 227 empresas (55% micro, 31% pequeña y 14% mediana).

El diseño del cuestionario se efectuó a partir de la revisión de la literatura científica existente sobre los aspectos investigados. El instrumento de recolección de datos ha incluido las variables estructurado en bloques de preguntas, que incluye aspectos generales de la empresa como: sector de actividad, ubicación geográfica, número de empleados, género del gerente, control familiar de

la empresa, así como preguntas relacionadas a las expectativas de crecimiento de empleo y ventas. El segundo bloque del cuestionario incluye preguntas sobre cómo ha impactado la actual crisis generada por la pandemia del Covid-19 en determinados indicadores de su empresa.

En cuanto al análisis estadístico de los datos y de manera a contrastar la existencia o no de diferencias significativas en el perfil de respuestas, fueron utilizadas las siguientes variables de clasificación: el tamaño, la antigüedad y el sector económico en el que se desempeña la empresa. La significación estadística de las diferencias que fueron observadas en las respuestas y teniendo en cuenta el factor de clasificación utilizado, han sido evaluadas utilizando la prueba estadística “Test de Chi-cuadrada (χ^2) de Pearson”, con la finalidad de valorar si dos variables se encuentran relacionadas, al analizar diferencias porcentuales utilizando el análisis de tablas de contingencia. Para el caso de variables cuantitativas, donde se analice la diferencia de medias según un criterio de clasificación, se utilizó la prueba de contraste de Análisis de la Varianza (ANOVA).

Resultados

La antigüedad media de las empresas participantes

es de 12,6 años, y el 70 % de ellas corresponden a empresas familiares. El 36% son empresas gestionadas por mujeres y el 78% de los propietarios o gerentes cuentan con estudios universitarios. El 26% de las empresas participantes han declarado haber recibido algún tipo de apoyo o soporte no económico, mientras que un 17% manifestaron haber recibido subsidios o beneficios económicos como parte de las estrategias del gobierno para mitigar los efectos de la pandemia. Al momento de completar el cuestionario, 16% de las mipymes declaran que utilizan el teletrabajo. En este sentido, 30% manifiestan que continuarán utilizando el teletrabajo aún después de que finalice la pandemia del Covid-19. A continuación, se exponen los resultados obtenidos en dichas dimensiones para cada una de las categorías de análisis.

Impacto de las relaciones con clientes y proveedores durante la pandemia

Haciendo un análisis más detallado, a continuación se expone el resultado del comportamiento de las relaciones respecto a los proveedores y los clientes durante la pandemia Covid-19, teniendo en cuenta determinados factores como el tamaño, antigüedad y sector. En la Tabla 1 se observa los distintos resul-

Tabla 1. relaciones con proveedores y clientes, según tamaño, sector y antigüedad. Diferencias estadísticamente significativas: (*): $p < 0,1$; (**): $p < 0,05$; (***): $p < 0,01$; (-) no significativa.

	Tamaño de la Empresa			Sig.	Sector Económico			Sig.	Antigüedad		Sig.
	Micro	Peq.	Med.		Ind.	Serv.	Otro		Jóvenes ≤ 10 años	Maduras > 10 años	
Cadena de proveedores afectadas	3,29	3,54	3,13	-	3,4	3,1	3,6	*	3,33	3,36	-
Los proveedores han endurecido su plazo de pago	3,0	3,5	3,4	*	3,2	3,1	3,3	-	3,26	3,30	-
Las condiciones de pago de nuestros clientes se han vuelto más largas	3,33	3,67	3,90	*	3,6	3,4	3,7	-	3,28	3,56	-
La cancelación de pedidos de clientes ha aumentado significativamente	3,2	3,5	3,6	-	3,2	3,4	3,5	-	3,21	3,42	-
Las pérdidas por impago de clientes han aumentado	2,65	3,07	3,10	-	2,8	2,9	3,0	-	2,99	2,90	-

En una escala de 1 = Total desacuerdo a 5 = Total acuerdo

Tabla 2. Evolución del empleo entre 2019 – 2020, en relación al tamaño, sector y antigüedad. Diferencias estadísticamente significativas: (*): $p < 0,1$; (**): $p < 0,05$; (***): $p < 0,01$. (-) no significativa.

	Tamaño de la Empresa			Sig.	Sector Económico			Sig.	Antigüedad		Sig.
	Micro	Peq.	Med.		Ind.	Serv.	Otro		≤ 10 años	Maduras > 10 años	
Aumento (%)	13,2	18,6	12,9	-	22,9	13,2	6,9	-	16,4	12,9	-
Estabilidad (%)	42,1	30,0	22,6	-	28,6	37,4	41,4	-	40,3	28,2	*
Disminución (%)	44,6	51,4	64,5	-	48,6	49,5	51,7	-	43,3	58,8	-
Saldo de Evolución	-31,4	-32,9	-51,6		-25,7	-36,3	-44,8		-26,9	-45,9	

tados respecto a los tres factores mencionados. Se observa que la mayoría de las variables presentan valores por encima de 3, sin embargo, aquellas variables con valores por debajo de 3 parecen indicar que no ha tenido un impacto relevante en esta crisis. Por otro lado, se observan que algunas variables presentan diferencias estadísticamente significativas. Así, por ejemplo se observa diferencias respecto al tamaño de la empresa con algunas variables. En este sentido, las pequeñas (3,5) y las medianas empresas (3,4) presentan diferencias estadísticamente significativas al 10%. Al parecer sus relaciones se vieron más afectadas con sus proveedores, especialmente porque estos han endurecido sus plazos de pago con las pymes durante la pandemia. Por otro lado cuando se mira por el lado de los clientes, se observa que las medianas empresas han sido afectadas significativamente (3,90), específicamente por las extendidas condiciones de pago por parte de sus clientes.

En la misma Tabla 1 se muestra los resultados obtenidos teniendo en cuenta el sector de la actividad, y se observa que también existen diferencias significativas con cierta variable. En este sentido, podemos afirmar que algunos sectores como “otros” con valor 3,6 así como el sector industrias manufacturas con valor 3,4 se han visto más afectados por problemas relacionados a sus cadenas de proveedores. Por otro lado, al analizar la forma en que fueron afectadas respecto a la antigüedad de la empresa observamos que no existen diferencias significativas, por lo que, esta dimensión no ha sido relevante o significativo a las operaciones relacio-

nadas a clientes y proveedores.

Impacto del Covid-19 en el empleo en las mipymes

De acuerdo a la Tabla 2, los datos obtenidos respecto al empleo en las mipymes de Asunción y Departamento Central al considerar la evolución del 2020 con relación al 2019, muestran que el 22% de las mipymes redujeron su empleo, un 56,5% los mantuvo y el restante 21,5% de las empresas han logrado aumentarlo.

Para conocer en mayor detalle el impacto generado en el empleo a causa de la pandemia, también se realizó un análisis en relación al tamaño de la empresa, sector económico al que pertenecen y la antigüedad de la empresa. Se realizó un cálculo de las diferencias entre el porcentaje de empresas que aumentaron la generación de empleos con los porcentajes de aquellas que presentan una disminución en el empleo. Estas diferencias se expresan como “saldo de evolución”. Se puede observar que entre los años 2019 y 2020 el empleo ha tenido una marcada evolución negativa en todos los tamaños de empresas que han sido consideradas en este estudio. Así, se reporta una caída del -31,4% en las microempresas, -32,9% en las pequeñas y -51,6% para las medianas empresas. Sin embargo, no se observan diferencias significativas respecto al tamaño.

Respecto al sector de la actividad económica en el que se desenvuelven las empresas participantes del estudio, hay una diferencia más desfavorable en la evolución del empleo de 2019 a 2020 para las empresas del sector “otros” y el sector “servi-

cios”. En el sector “otros” -que incluyen comercio y construcción especialmente- hay una diferencia de -44,8%, en el sector servicio la diferencia es de -36,3%, mientras que en el sector industrial la diferencia es menor, con -25,7%. Tampoco se observan diferencias significativas entre los sectores económicos.

Por otro lado, al considerar la antigüedad de la empresa en relación a la evolución del empleo del 2019 al 2020, se presentan datos que marcan diferencia estadísticamente significativa. Las empresas consideradas jóvenes, con una vigencia menor o igual a diez años, presentan un saldo de evolución de -26,9% y las empresas más antiguas, con una vigencia mayor a 10 años, presentan un saldo de evolución de -45,9%. Se observa que las empresas jóvenes (40,3) presentan diferencias significativas respecto a las empresas maduras (28,2), con relación a la capacidad de mantener los empleos durante la pandemia.

Impacto del Covid-19 en las ventas en las mipymes

En la Tabla 3, se observa que el 72% de las empresas participantes indican haber tenido una disminución en las ventas del 2020 con relación al 2019, como consecuencia de la crisis generada por el Covid-19. Hay un 13% de empresas que han podido mantener sus ventas, mientras que un 15% han conseguido un aumento. Al analizar el tamaño de las empresas no se observa diferencias significativas, pero igualmente los resultados son importantes para resaltar. Así, el saldo de evolución para los tres

tamaños de empresa muestra resultados negativos y contundentes, siendo las medianas empresas las que presentan una evolución más favorable en un 43.3%. Las micro y pequeñas empresas han tenido un impacto negativo más profunda en su ventas.

Los sectores económicos que presentaron una evolución más desfavorable en 2020 han sido el sector servicio (-70,8%), y el sector denominado “otro” con un saldo también desfavorable (-65, %). El sector ligado a las industrias manufactureras ha sido el que menos impacto ha tenido respecto a las ventas (con -32,4%). En este sentido, los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas al 5% en la evolución de las ventas de los años 2019 y 2020. Específicamente se observa que el sector de industria manufacturera ha tenido una mayor capacidad para mantener las ventas durante la pandemia, en comparación con los otros sectores analizados.

Por otro lado, el factor antigüedad de la empresa no ha mostrado diferencias significativas de comportamiento en la evolución de las ventas en el periodo 2019 y 2020. Durante el periodo de 2019 a 2020 las empresas maduras fueron las que experimentaron una mayor reducción en sus ventas con una caída del 77.4%. En general, el saldo de evolución fue negativo tanto para empresas jóvenes como maduras, pero en las empresas jóvenes el impacto fue menor, con un 51.1%. Una de las razones de este resultado, podría ser que muchas empresas maduras no pudieron renovarse con la llegada de la crisis, ya que venían realizando un tipo de actividad sostenido a lo largo de los años, mientras que las empresas jóvenes mostraron más dinamismo y

Tabla 3. Evolución de las ventas entre 2019 – 2020, en relación al tamaño, sector y antigüedad. Diferencias estadísticamente significativas: (*): $p < 0,1$; (**): $p < 0,05$; (***): $p < 0,01$. - no significativa.

	Tamaño de la Empresa			Sig.	Sector Económico			Sig.	Antigüedad		Sig.
	Micro	Peq.	Med.		Ind.	Serv.	Otro		Jóvenes ≤ 10 años	Maduras > 10 años	
Aumento (%)	13,9	13,0	23,3	-	26,8	7,9	12,1	-	17,0	13,1	-
Estabilidad (%)	15,6	10,1	10,0	-	14,1	13,5	10,3	**	14,8	9,5	-
Disminución (%)	70,5	76,8	66,7	-	59,2	78,7	77,6	-	68,1	77,4	-
Saldo de Evolución	-56,6	-63,8	-43,3		-32,4	-70,8	-65,5		-51,1	-64,3	

adaptación para la realización de nuevos proyectos para mantener las ventas.

Conclusiones

En este estudio se evidencia que en Paraguay y específicamente en el área de la Capital del país y el Departamento Central se ha registrado una importante disminución en los empleos y las ventas en las mipymes, como consecuencia de la crisis generada por el Covid-19. Asimismo, se demuestra que las relaciones con los proveedores y el comportamiento de los clientes, han generado también impacto negativo en la vida económica de estas empresas. Los resultados revelan comportamiento diferenciado respecto al impacto negativo según el tamaño, sector y antigüedad de estas empresas.

Así, los cambios en la cadena de proveedores y el endurecimiento de los plazos de pagos han demostrado tener impacto negativo de mayor contundencia en el sector denominado “otros” que integra comercio y construcción- y en las pequeñas empresas. Asimismo las condiciones más larga en los procesos de pagos por parte de los clientes, ha sido un factor negativo clave que ha repercutido en la vida de las medianas empresas durante la crisis.

También se refleja que los empleos han sufrido grandes reducciones en las mipymes, sin discriminación de acuerdo al tamaño, sector o edad de las empresas. Sin embargo, se observa que las empresas jóvenes han tenido mayores capacidades o herramientas para mantener los empleos en este tipo de empresas. Las pérdidas de empleo ocasionado por la crisis Covid-19 en las mipymes, no solamente han tenido consecuencias económicas en los hogares, sino también ha generado graves problemas sociales, que se ha agudizado principalmente en los países en vías de desarrollo. En este sentido, Qian & Fan (2020) encontraron que la pandemia del Covid-19 ha creado nuevas formas de desigualdades además de las que ya existían anteriormente y que fueron exacerbadas a raíz de esta situación extrema, magnificando las diferencias sociales, por lo que las políticas públicas juegan un papel importante en la supervivencia y recuperación de las empresas más pequeñas y con menos recursos.

Asimismo, se concluye que la disminución de las ventas también ha sido un factor común en estas empresas, sin importar tamaño, sector o antigüedad de las empresas, especialmente durante el año 2020 cuando las medidas restrictivas eran más fuertes. Por otro lado, se ha encontrado se observa que el sector de industria manufacturera ha demostrado diferencias en su comportamiento respecto a mantener las ventas con relación a los demás sectores analizados.

Posiblemente este sector ha tenido mejores herramientas o acceso a recursos financieros, lo que ha facilitado que un porcentaje importante de empresas hayan tenido la capacidad de mantener sus ventas. En este sentido, Dua et al., (2020) destacan que de manera a que las pequeñas empresas puedan sobrevivir a la crisis generada por el Covid-19 es necesario encontrar nuevos modelos de negocios y usar soluciones tecnológicas que no todas las empresas están en condiciones de financiar. Señalan además que es necesario mejorar la capacidad y resistencia de las pequeñas empresas dotándoles de oportunidades de financiamiento.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que, a pesar de las dificultades, las mipymes paraguayas han hecho un gran esfuerzo por mantenerse funcionando y por mantener los empleos. En general, las empresas participantes muestran un optimismo y buenas expectativas con miras a la recuperación de sus negocios.

Por último, la investigación requiere estudios de seguimiento para monitorear la evolución de los resultados encontrados.

Agradecimientos

Se agradece especialmente al Programa de Iniciación Científica (PIC) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción por permitir llevar adelante esta investigación con involucramiento de docentes y estudiantes. También se agradece al Viceministerio de Mipymes del Ministerio de Industria y Comercio (MIC) por el apoyo que ha brindado para el trabajo de campo de la presente investigación.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Albonico, M., Mladenov, Z. & Sharma, R. (2020) [16.vi.2020]. How the COVID-19 crisis is affecting UK small and medium-size enterprises. *McKinsey & Company Public Sector Insights*. [Consulted: 06/10/2022]. <<https://www.mckinsey.com/industries/public-sector/our-insights/how-the-covid-19-crisis-is-affecting-uk-small-and-medium-size-enterprises>>.
- Alves, J., Lok, T. C., Luo, Y. & Hao, W. (2020). Crisis Management for Small Business during the COVID-19 Outbreak: Survival, Resilience and Renewal Strategies of Firms in Macau. *Frontiers of Business Research in China*, 14(26): 1–29.
- Ansell, C. & Boin, A. (2019). Taming Deep Uncertainty: The Potential of Pragmatist Principles for Understanding and Improving Strategic Crisis Management. *Administration & Society*, 51(7): 1079–1112.
- Bargados, A. (2021). Impacto del Covid-19 en las PyMEs argentinas : actividad, empleo y condiciones de trabajo. *Trabajo y Sociedad*, 22(36): 122–145.
- Baum, T. & Hai, N. T. T. (2020). Hospitality, tourism, human rights and the impact of COVID-19. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 32(7): 2397–2407.
- Blustein, D. L., Duffy, R., Ferreira, J. A., Cohen-Scali, V., Cinamon, R. G. & Allan, B. A. (2020). Unemployment in the time of COVID-19: A research agenda. *Journal of Vocational Behavior*, 119(103436): 1–4.
- Burhan Ismael, N., Sorguli, S., Mahmood Aziz, H., Sabir, B. Y., Hamza, A., Gardi, B., Rafaat, F. & Al-Kake, A. (2021). The Impact of COVID-19 on Small and Medium-Sized Enterprises in Iraq. *Annals of R.S.C.B.*, 25(5): 2496–2505.
- CEPAL [Comisión Económica para América Latina y el Caribe]. (2020). América Latina y el Caribe ante la pandemia del COVID-19. Efectos económicos y sociales. *Informe Especial Covid-19*, 1: 1–15.
- Chirume, E. & Kaseke, N. (2020). Impact of covid-19 on small and medium-sized enterprises (SMEs) in Chinhoyi, Zimbabwe. *International Journal of Business, Economics and Law*, 23(1): 101–110.
- Contreras, R., Cruz, D. & García, R. A. (2021). Selección organizacional: resiliencia y desempeño de las pymes en la era de la COVID-19. *Estudios Gerenciales*, 37(158): 73–84.
- Corchuelo Martínez-Azúa, B., López-Salazar, P.E. & Sama-Berrocal, C. (2021). Impact of the COVID-19 Pandemic on Agri-Food Companies in the Region of Extremadura (Spain). *Agronomy*, 11(5)971: 1–30.
- Cueva-Rivera, X. E. & Erazo-Álvarez, J. C. (2021). Impacto socioeconómico del COVID-19 en las micro, pequeñas y medianas empresas. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 6(12): 77–113.
- Donthu, N. & Gustafsson, A. (2020). Effects of COVID-19 on business and research. *Journal of Business Research*, 117(June): 284–289.
- Dua, A., Mahajan, D., Oyer, L. & Ramaswamy, S. (2020) [7.vii.2020]. US small-business recovery after the COVID-19 crisis. *McKinsey & Company Public Sector Insights*. [Consulted: 06/10/2022]. <<https://www.mckinsey.com/industries/public-sector/our-insights/us-small-business-recovery-after-the-covid-19-crisis>>.
- Ebersberger, B. & Kuckertz, A. (2021). Hop to it ! The impact of organization type on innovation response time to the COVID-19 crisis. *Journal of Business Research*, 124(January): 126–135.
- Ernst C. & López Mourelo, E. (2021). *El COVID-19 y el mundo del trabajo en Argentina: impacto y respuestas de política*. Informe

- Técnico. Buenos Aires: Oficina de País de la Organización Internacional del Trabajo para Argentina. 35 pp.
- Ferrer Dávalos, R.M. (2021). Implicancias de las medidas de mitigación adoptadas ante el avance del covid-19 en las microempresas de Paraguay. *Cuyonomics: Investigaciones En Economía Regional*, 5(7): 126–149.
- García Pérez de Lema, D., Marín-Hernández, S. & Somohano-Rodríguez, F. (2021). *Impacto económico de la COVID-19 sobre la PyME en España*. Informe Pyme 2021. Madrid: Consejo General de Economistas de España / Estudio Gráfico Desdecero. 60 pp.
- Gregurec, I., Furjan, M. T. & Tomičić-pupek, K. (2021). The impact of covid-19 on sustainable business models in SMEs. *Sustainability*, 13(3)1098: 1–24.
- Heredia, A., Aguilar, P., y Sainz, N. (2020). Situación de las PyMEs de Hermosillo, Sonora ante la crisis presentada por COVID-19. *Revista de Investigación Académica Sin Frontera: División De Ciencias Económicas y Sociales*, (32): 1–22.
- Hrivnák, M., Moritz, P. & Chreneková, M. (2021). What Kept the Boat Afloat? Sustainability of Employment in Knowledge-Intensive Sectors Due to Government Measures during COVID-19 Pandemic. *Sustainability*, 13(15)8441: 1–21.
- Korankye, B. (2020). The Impact of Global Covid-19 Pandemic on Small and Medium Enterprises in Ghana. *International Journal of Management, Accounting and Economics*, 7(6): 255–276.
- Marconatto, D.A.B., Teixeira, E.G., Peixoto, G.A. & Faccin, K. (2021). Weathering the storm: What successful SMEs are doing to beat the pandemic. *Management Decision*, 60(5): 1369–1386.
- Nevskaya A. (2020). Interaction of Corporate Structures in the EU: Impact of Digitalization. *World Economy and International Relations*, 64(10): 93–102.
- Nicola, M., Alsafi, Z., Sohrabi, C., Kerwan, A., Al-Jabir, A., Iosifidis, C., Agha, M. & Agha, R. (2020). The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. *International Journal of Surgery*, 78(June): 185–193.
- O'Connor, C.M., Anoushiravani, A.A., DiCaprio, M.R., Healy, W.L. & Iorio, R. (2020). Economic Recovery After the COVID-19 Pandemic: Resuming Elective Orthopedic Surgery and Total Joint Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*, 35(7): S32–S36.
- Piper, R. & Sanfilippo, E. de. (2021). Impacto Económico de la crisis covid-19 sobre la MIPyME en Panamá. Informes MIPyME, Junio 2021. Cartagena: FAEDPYME. 52 pp.
- Qian, Y. & Fan, W. (2020). Who loses income during the COVID-19 outbreak? Evidence from China. *Research in Social Stratification and Mobility*, 68(August)100522: 1–5.
- Sharma, P., Leung, T. Y., Kingshott, R. P. J., Davcik, N. S. & Cardinali, S. (2020). Managing uncertainty during a global pandemic: An international business perspective. *Journal of Business Research*, 116(August): 188–192.
- Todo T. & Inoue H. (2021). Geographic diversification of the supply chains of Japanese firms. *Asian Economic Policy Review*, 16(2): 1–19.
- Twahirwa, E., Mtonga, K., Jayavel, K., Kasakula, W. & Bamurigire, P. (2021). Assessment of the Impact of COVID-19 on Operations of Local Businesses and Level of Enforcement of Public Health Safety Measure within Business Premises: A Quantitative Study of Businesses in Huye-Rwanda. *Sustainability*, 13(23)13013: 1–11.
- Valdes, A. S. & Rogel, R.M.N. (2020). Perspectiva de las PYMES Restauranteras en el escenario actual de la crisis del COVID-19. *3C Empresa: Investigación y Pensamiento Crítico*, Edición Especial COVID-19(Empresa, China y Geopolítica): 129–147.
- Veugelers, R., Rückert, D. & Weiss, C. (2019). Bridging the Divide: New evidence about firms and digitalisation. *Bruegel Policy Contribution*, 17(December): 1–13.

Riqueza de aves en el Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael y su zona de amortiguamiento-Paraguay

Bird Diversity in the San Rafael National Park Reserve Area and its Buffer Zone - Paraguay

Patricia Salinas^{1,*}, Alberto Esquivel² & Juan Emanuel Pech³

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Biología, San Lorenzo, Paraguay.

²World Wildlife Fund Paraguay, Asunción, Paraguay.

³Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Tuxpán, Veracruz, México.

*Autor correspondiente: patrisali93@gmail.com.

Resumen: La Reserva para Parque Nacional San Rafael (Departamento de Itapúa y Caazapá) es uno de los últimos remanentes grandes de BAAPA, y la mayor prioridad de conservación a nivel nacional, ya que contiene la mayor riqueza de aves del país. El objetivo fue analizar la riqueza y composición de aves en los fragmentos boscosos y sus áreas de influencia de los sitios con agricultura de soja de la Reserva para Parque Nacional San Rafael, utilizando la metodología de Listas de 10 especies de MacKinnon, en ocho períodos entre noviembre 2017 y febrero de 2020. Se identificaron 177 especies de aves pertenecientes a 47 Familias, y 19 Órdenes, de las cuales 114 han sido registradas en 27 listas en ambientes de bosques y 134 especies en 69 listas en la zona productiva. Del total de las especies, 31 son endémicas del Bosque Atlántico del Alto Paraná, incluyendo al Loro vinoso *Amazona vinacea* (en peligro de extinción a nivel mundial) y la Mosqueta Media Luna *Phylloscartes eximius* (Casi-Amenazada). A nivel nacional, 28 especies endémicas están amenazadas de extinción a nivel nacional. Se registraron especies de aves exclusivas para la zona de bosque, y especies exclusivas para la zona productiva, dando como resultado un 63,27 % de complementariedad. A pesar de los cambios de uso de tierra al cual se encuentra sometido el área de estudio, se registraron una gran diversidad de aves destacando el elevado número de especies endémicas y amenazadas a nivel nacional e internacional, tanto en los sitios muestreados dentro de la reserva y su zona de amortiguamiento. Estos datos contribuyen al conocimiento y realzan la importancia de estos remanentes para la conservación de las aves.

Palabras clave: Avifauna, conservación, endemismo, monitoreo.

Summary: The Reserve for Park San Rafael (Itapúa and Caazapá Departments) is one of the last large remnants of BAAPA and is the biggest conservation priority at the national level since it contains the country's highest bird species richness. The objective was to analyze the richness and composition of birds in forest fragments and its areas of influence of soy agricultural areas at Reserve for Park San Rafael, utilizing the methods of MacKinnon 10 species list, during 8 periods between November 2017 and February 2020. 177 bird species, belonging to 47 families and 19 orders were registered. Of these, 114 have been registered in 27 lists for forest environments and 134 species in 69 lists in productive zones. 31 of these species are endemic to the Atlantic Forest of Alto Parana, including the vinaceous-breasted parrot *Amazona vinacea* (endangered at the international level) and the southern bristle tyrant *Phylloscartes eximius* (Near-Threatened). At the national level, 28 endemic species are threatened with extinction at the national level. Bird species exclusive to the forest zone and species exclusive to the productive zone were recorded, resulting in a 63.27% complementarity. Despite the changes in land use to which the study area is subjected, a great diversity of birds was recorded, highlighting the high number of endemic and threatened species at the national and international level, both in the sites sampled within the reserve. and its buffer zone. These data contribute to knowledge and highlight the importance of these remnants for the conservation of birds.

Key words: Avifauna, conservation, endemism, monitoring.

Introducción

El Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAPA) es la región más húmeda del Paraguay y presenta un estrato de bosque alto y húmedo (Del Castillo et

al., 2004); es un bosque subtropical, denominada también como Selva Paranaense o Selva misionera. Esta ecorregión ha sido reconocida como una de las más diversas del planeta, con un elevado

Recibido: 11/02/2022 Aceptado: 14/04/2023



2078-399X/2023 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>).

número en biodiversidad y de especies endémicas (Peralta et al., 2018).

En el país, en el Bosque Atlántico se han registrado unas 530 especies de aves, de las cuales 81 especies son endémicas a la ecorregión (Del Castillo et al., 2004), sin embargo, su estado de conservación es crítico, debido a la deforestación, la expansión de la agricultura y la caza indebida que amenazan a los pequeños remanentes de bosques que existen (Fundación Moisés Bertoni, 2007).

El Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael es reconocida como el segundo remanente con cobertura importante del BAAPA en el Paraguay, habiendo sido reconocida como la primera IBA (Área de Importancia para las Aves, por su sigla en inglés) nacional y segundo en Latinoamérica. Esto hace que sea nominada como “Bosques de Alto Valor de Conservación” (De Egea & Balbuena, 2011). Se caracteriza por presentar bosques densos, semicaducifolios y húmedos, que pueden alcanzar alturas de hasta 30 m, con numerosas especies de árboles de importancia forestal, pastizal en suelo saturado, vegetación no graminoidea y vegetación hidromórfica permanente (Quintana et al., 2002).

Ante la degradación del bosque del Parque San Rafael una de las estrategias para su restauración y conservación ecológica sería la conectividad en masa boscosa tanto dentro de la reserva como la zona de amortiguamiento (Amarilla et al., 2020).

Hoy en día, la diversidad biológica que albergan sus remanentes se encuentra sometidos a muchas presiones antrópicas, entre ellas las aves. Con este trabajo se pretende estudiar la diversidad de aves en las zonas del parque y su zona de amortiguamiento, y así registrar la avifauna presente ante los cambios permanentes del ambiente.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael (26°25'S, 55°40'O) y su zona de amortiguamiento. Está ubicada al norte del departamento de Itapúa y al sur de Caazapá, Paraguay. Las estaciones fueron clasificadas en dos categorías con base en el paisaje predominante: 1)

bosques: cuando el punto de muestreo se encuentra al menos a una distancia mínima de 200 m. del borde del bosque con otro hábitat; 2) zona productiva: cuando el punto de muestreo se encuentra en una zona predominantemente de productores de soja.

Censos de aves

Se seleccionaron un total 22 estaciones de muestreo en el área de la Reserva San Rafael y su zona de amortiguamiento. Durante 18 días distribuidos en ocho muestreos entre noviembre 2017 y febrero de 2020, cubriendo parte de la primavera, verano y otoño.

Se utilizaron listas MacKinnon (MacKinnon & Phillipps, 1993) para el registro de aves. En este estudio, se utilizaron listas de diez especies, recomendado por Herzog et al. (2002) y O'Dea et al. (2004), registrando cada especie vista u oídas en el punto de muestreo, una sola vez hasta completar las 10 especies (i.e. bosque o remanente), con el objetivo de obtener datos de cada ambiente para su análisis y comparación. Una vez obtenida las 10 especies de una lista, el observador se desplazaba a otro sitio del punto de muestreo, para iniciar otra lista, evitando potenciales doble conteo de individuos.

La acumulación de listas de MacKinnon en los ocho muestreos, se realizaron mediante recorridos aleatorios en cada hábitat y se identificaron a las especies de manera visual y auditiva, con la ayuda de la guía de aves de Paraguay, (Narosky, & Yzurrieta, 2006). Los recorridos y conteos se realizaron desde la primera hora de la mañana hasta el final de la tarde. De las 22 estaciones de muestreo seleccionadas, cuatro se encuentran dentro de los límites de la Reserva y 18 en la zona de amortiguamiento. De estos últimos, ocho se encuentran en bosques y 14 en las zonas productivas (Fig. 1).

Taxonomía y estado

La nomenclatura científica de las especies se basa en SACC, Del Castillo et al. (2021). El estado de conservación global de las especies se basa en BirdLife International (2021). El estatus de especies endémicas se basa en Brooks et al. (1999) y a Del Castillo et al. (2004), con la adición del chacurú

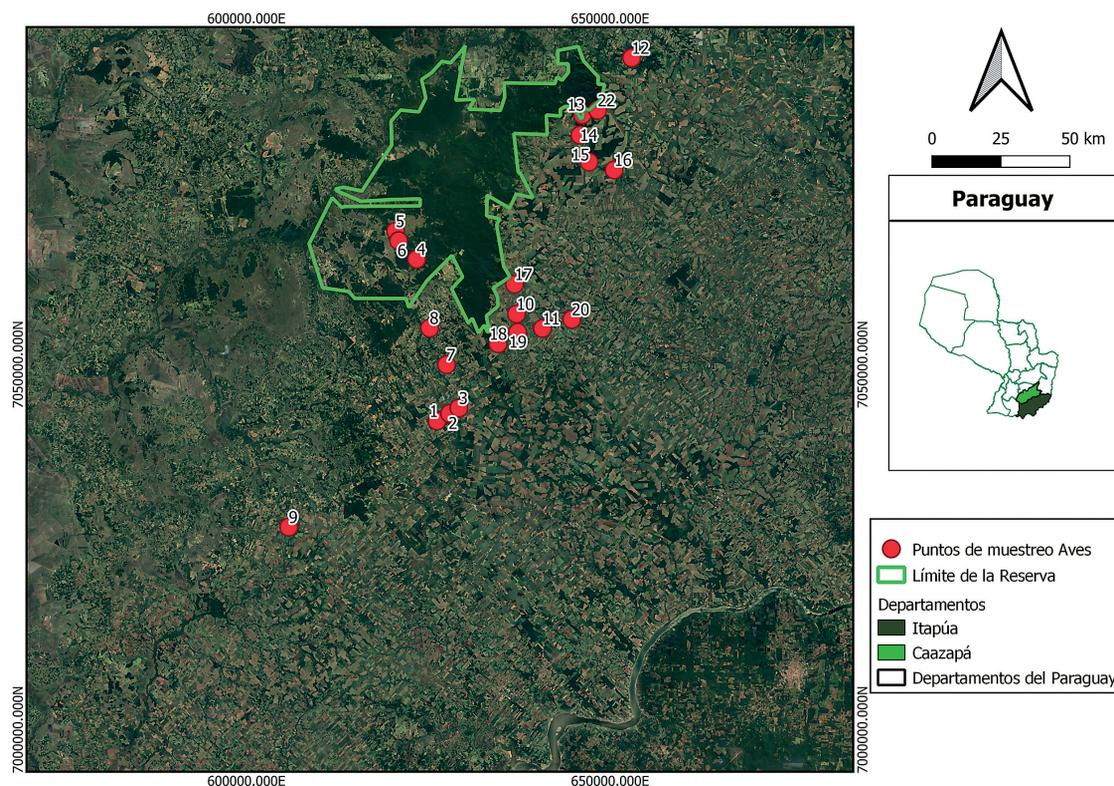


Figura 1. Mapa con los puntos de muestreo de Aves dentro del Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael y su zona de amortiguamiento.

grande (*Notharchus swainsoni*) y la exclusión del yacutoro (*Pyroderus scutatus*). La categorización de amenaza a nivel nacional sigue la Resolución MADES 254/2019.

Análisis de los datos

Análisis de riqueza

Para los análisis de las estimaciones de riqueza de especies y curvas de acumulación de especies se utilizó el programa EstimateS, versión 9.1.0 (Colwell 2019), con aleatorizaciones de los datos de incidencia de las muestras de las listas MacKinnon. En un total de 1000 aleatorizaciones, las especies fueron tomadas al azar del conjunto de los datos sin reemplazamiento y añadidas a la curva.

Análisis de complementariedad

Para los análisis de complementariedad se utilizó la base de datos de presencia y ausencia en una planilla Excel. Dicho análisis permitió conocer el área con mayor riqueza de especies, y los sitios que

aporten nuevas especies al listado general, siendo estos los más complementarios a nivel paisaje (Morales, 2018). Se define a la complementariedad al grado de disimilitud en la composición de especies entre dos o más ambientes diferentes (Colwell & Coddington, 1994).

En el Manual de Moreno (2001), se menciona que para obtener el valor de complementariedad obtenemos primero dos medidas: **I.** La riqueza total para ambos sitios combinados: $S_{AB} = a + b - c$. Donde a es el número de especies del sitio A, b es el número de especies del sitio B, y c es el número de especies en común entre los sitios A y B. **II.** El número de especies únicas a cualquiera de los dos sitios: $U_{AB} = a + b - 2c$, a partir de estos valores calculamos la complementariedad de los sitios A y B como:

$$C_{AB} = \frac{U_{AB}}{S_{AB}}$$

Resultados y discusión

Análisis de riqueza

Riqueza de especies en el Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael y su zona de amortiguamiento

La avifauna de San Rafael y su zona de amortiguamiento ha sido evaluado a través de un total de 96 listas MacKinnon en 22 estaciones de muestreo, con un total de 177 especies de aves pertenecientes a 47 Familias, y 19 Órdenes (Anexo 1).

De la avifauna total registrada, 134 especies se registraron en zona productiva y 114 han sido registradas en ambientes de bosque, este último representa el 27 % de las especies presentes en hábitats de bosques mencionadas en RPSF (Esquivel et al. 2007, Esquivel & Peris 2012, Smith et al, 2017, Esquivel et al, 2019, Smith et al, 2021).

A pesar de los múltiples trabajos realizados en el monitoreo de aves para San Rafael, en los sitios que podrían parecer ya conocidos se siguen sumando nuevos registros para el lugar la documentación de cinco especies adicionales que suman un total de 431 especies (Smith et al, 2021).

El orden con mayor número fue Passeriformes con 113 especies y las familias con mayor riqueza de especies fueron Tyrannidae, Furnariidae, Thamnophilidae, Thraupidae, Icteridae, Columbidae, Psittacidae, Picidae, Tinamidae, Tityridae, Trochilidae, Turdidae, coincidiendo con Moreira-Lima 2013 que del total de las especies de aves para la Malta Atlántica de Brasil se encuentran representadas en 26 órdenes, de las cuales el Orden Passeriformes presenta una mayor riqueza, las especies se encuentran agrupadas en 80 familias, siendo Tyrannidae, Thamnophilidae, Thraupidae, Furnariidae, Trochilidae, Accipitridae, Emberizidae, Rhynchocyclidae, Psittacidae e Picidae las familias con mayor especies.

Estimación de riqueza de especies de aves en los bosques y en zonas productivas

La curva de acumulación de especies de todas las aves registradas en 27 listas MacKinnon en los bosques y 69 listas en zonas de productores,

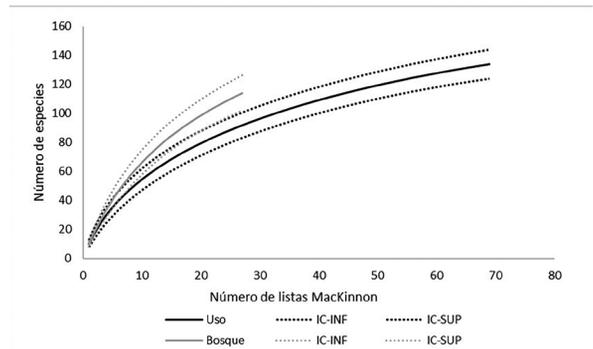


Figura 2. Curva de acumulación de especies. **Referencia:** Listas MacKinnon en los bosques (líneas grises) y listas en zonas de productores (líneas negras).

muestra que el esfuerzo de muestreo en los bosques ha sido aún insuficiente, pudiendo sumarse aún nuevas especies. Con las 27 listas realizadas en los bosques, se estima una riqueza de 114,00 (95% IC = 101.79- 126.21) especies. En las zonas de productores se estima una riqueza de 134,00 (95% IC = 124.0 – 143.94) especies considerando las 69 listas realizadas (Fig. 2).

Análisis de complementariedad:

Durante el muestreo, 43 especies registradas han sido exclusivas para la zona de bosque, y 63 especies exclusivas para la Zona productiva. Sesenta y ocho especies han estado presentes en ambos ambientes, dando como resultado un 63,27 % de complementariedad (Fig. 3).

El análisis de complementariedad entre sitios muestra que la riqueza no está tan relacionada a la

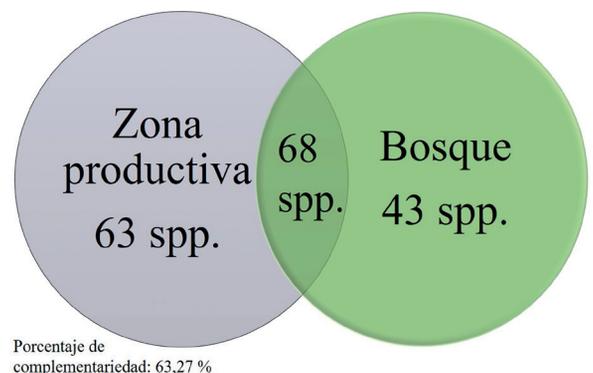


Figura 3. Número de especies por categoría de sitio y porcentaje de complementariedad.

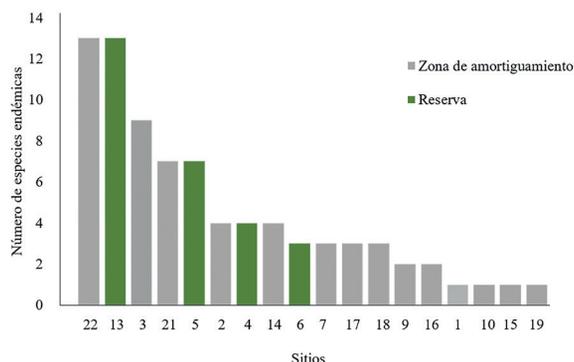


Figura 4. Riqueza de especies de aves endémicas registradas en los sitios de muestreo.

importancia de un sitio a nivel de paisaje (Morales, 2018), a pesar de poseer mayor cantidad de especies exclusivas en los sitios de zona productiva el porcentaje de complementariedad con las zonas de bosques fue del 63,27%, es decir que se registran más de la mitad de las especies en ambos ambientes.

Además, la zona de bosque presentó 43 especies exclusivas, y la zona productiva 63 especies, esto puede deberse a que ambos sitios no presentan composiciones vegetales iguales y que las zonas productivas están más antropizadas, concordando con Morales et al. (2018) que menciona, que para lograr un correcto inventario se deben elegir hábitats heterogéneos, ya que esto ayuda a tener mayor recambio de especies.

Especies endémicas del Bosque Atlántico del Alto Paraná – BAAPA:

Treinta y una especies de las 177 registradas durante el estudio son endémicas de la ecorregión del BAAPA. Esto equivale al 44 % de las especies de aves endémicas registradas para San Rafael, Esquivel et al. (2019).

De los 22 sitios de muestreo, 18 registraron especies endémicas, para mayor representatividad se graficó diferenciando los sitios que se encuentran en la zona de amortiguamiento de color gris y los sitios dentro de la reserva en verde. El sitio 22 que se encuentra en la zona de amortiguamiento y el sitio 13 que se encuentra dentro del área de reserva presentan una riqueza de 13 especies de aves endémicas cada una, de las cuales solo comparten

4 especies el resto son exclusivas para cada sitio (Fig. 4).

Veintiocho especies endémicas del BAAPA fueron registradas en áreas de bosque, de las cuales trece también fueron registradas en áreas agrícolas. Tres especies adicionales fueron registradas únicamente en zonas productivas son: Saracura (*Aramides saracura*), Tiluchí estriado (*Dryophila malura*), Chiví coronado (*Hylophilus poicilotis*) (Tabla 1).

Especies de interés para la conservación a nivel Nacional y Global:

Siguiendo la categorización de amenaza según MADES (Resolución MADES 254/2019), dentro de las especies endémicas un total de 28 especies están **Amenazadas de extinción** a nivel Nacional. Durante el muestreo, se registraron 24 especies en el bosque, 14 de ellas de manera exclusiva en este ambiente, y 14 en zonas de productores, 4 de ellas observándose sólo en este ambiente.

Una especie se encuentra en la categoría de **En peligro de extinción (EN)** a nivel Nacional, el **Loro vinoso (*Amazona vinacea*)** y a nivel Internacional esta especie está categorizada en **En peligro de extinción (EN)**, registrada dentro de la reserva y la **Mosqueta Media Luna (*Phylloscartes eximius*) (Casi-Amenazada)** a nivel global, la misma fue registrada en la zona de amortiguamiento.

Con la recopilación de los trabajos en los distintos fragmentos que quedan del Bosque Atlántico del Paraguay, la avifauna oscila a unas 557 especies, esto representa a más del 80 % de las aves del país, cabe destacar que las áreas con más riqueza de especies del Bosque Atlántico son la Reserva para Parque Nacional San Rafael con el 77%, de las cuales 70 especies son endémicas, y la Reserva Natural del Bosque Mbaracayú con el 73 %, de las cuales 61 especies son endémicas del Bosque Atlántico (Esquivel, et al, 2019).

A pesar de estar tan fragmentado, la presencia de especies endémicas y clasificadas en alguna categoría de amenaza a nivel nacional e internacional, demuestran la importancia de estos remanentes para la conservación de la avifauna, coincidiendo con

Tabla 1. Especies endémicas del BAAPA registradas en bosques y zona de productores durante este estudio. **A)** Riqueza y taxonomía de las especies registradas en los sitios de estudio. **Referencia:** Categorizada según **MADES:** Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019). **UICN:** Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (2021).

Nº	Nombre común	Especies	Bosque	Zona de productores
1	Loro vinoso	<i>Amazona vinacea</i>	x	
2	Ticotico ocráceo chico	<i>Anabacerthia lichtensteini</i>	x	
3	Saracura	<i>Aramides saracura</i>		x
4	Ticotico ojo blanco	<i>Automolus leucophthalmus</i>	x	x
5	Yeruvá	<i>Baryphthengus ruficapillus</i>	x	
6	Bailarín azul	<i>Chiroxiphia caudata</i>	x	x
7	Chupadientes	<i>Conopophaga lineata</i>	x	x
8	Tiluchí estriado	<i>Dryophila malura</i>		x
9	Carpinterito barrado	<i>Dryobates spilogaster</i>	x	x
10	Tangará alcalde	<i>Euphonia pectoralis</i>	x	
11	Chiví coronado	<i>Hylophilus poicilotis</i>		x
12	Batará goteado	<i>Hypoedaleus guttatus</i>	x	
13	Batará pintado	<i>Mackenziaena leachii</i>	x	x
14	Batará copetón	<i>Mackenziaena severa</i>	x	x
15	Mosqueta enana	<i>Myiornis auricularis</i>	x	
16	Arañero silbón	<i>Myiothlypis leucoblephara</i>	x	x
17	Ermitaño escamado	<i>Phaethornis eurynome</i>	x	
18	Mosqueta media luna	<i>Phylloscartes eximius</i>	x	
19	Carpinterito cuello canela	<i>Picumnus temminckii</i>	x	x
20	Lorito cabeza roja	<i>Pionopsitta pileata</i>	x	x
21	Batará negro	<i>Pyrglena leucoptera</i>	x	
22	Chiripepé cabeza verde	<i>Pyrrhura frontalis</i>	x	x
23	Bailarín oliváceo	<i>Schiffornis virescens</i>	x	
24	Arasari chico	<i>Selenidera maculirostris</i>	x	
25	Pijuí corona rojiza	<i>Synallaxis ruficapilla</i>	x	x
26	Frutero coronado	<i>Tachyphonus coronatus</i>	x	x
27	Tiluchí enano	<i>Terenura maculata</i>	x	
28	Frutero cabeza castaña	<i>Thlypopsis pyrrhocomma</i>	x	
29	Surucúa	<i>Trogon surrucura</i>	x	x
30	Chincheró enano	<i>Xiphorhynchus fuscus</i>	x	
31	Mosqueta de anteojos	<i>Hemitriccus diops</i>	x	
Total			28	16

los autores Moreira-Lima (2013); Moreira-Lima & Silveira (2018) mencionan, que a pesar de que solo existe en 10% de la cobertura original del Bosque Atlántico del Brasil se siguen encontrando nuevas especies y del total registrado para ese país el 45% se encuentran en el Bosque Atlántico, de esta cifra el 24 % son especies endémicas.

Conclusiones

A pesar de las diferentes presiones antrópicas que se encuentra sometido la Reserva para Parque Nacional San Rafael se registraron una gran diversidad de aves destacando el elevado número de especies endémicas registradas en este estudio, tanto en San Rafael y su zona de amortiguamiento, con el 98% de las mismas, incluidas en la categoría de Amenazadas de extinción a nivel nacional, esto demuestra la importancia del sitio de estudio para la conservación de las aves del Bosque Atlántico.

Se encontró valores significativos de complementariedad (diversidad beta) en el recambio de la avifauna, casi la mitad de las especies comparten ambos sitios y a pesar de la diferencia de la cobertura vegetal la riqueza máxima se calcula sumando las especies en las zonas boscosas y las zonas productivas.

El alto valor que presenta el Área para Parque Nacional San Rafael y su zona de amortiguamiento para la conservación de la avifauna requiere formalizar su categoría de manejo y así tener una mejor protección, y no solo de las aves sino de toda la biodiversidad presente en el lugar, la falta de propuestas de protección de sitios muestreados con alta presencia de endemismos, especialmente en lugares situados fuera de los límites de la reserva.

Agradecimientos

Estos datos pertenecen al proyecto PINV15-002: “Evaluación del impacto de agroquímicos en la biodiversidad y el agua en el Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael y su zona de amortiguamiento”, el cual fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y ejecutado por la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN). A los propietarios y lugareños

de la zona, por los permisos concedidos y el apoyo a la investigación científica.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Amarilla, S., Insfran, P., Gill, A., Gonzalez, R. & Villalba, J. (2020). Caracterización de la degradación de la vegetación en la reserva para Parque San Rafael, Paraguay y pautas generales para su restauración. *Paraguaria Natural*, (7): 34-42.
- Birdlife International. (2021). *IUCN Red List for birds*. [Consulte: 3.ix.2021]. <<https://www.birdlife.org/projects/iucn-red-list/>>.
- Brooks, T., Tobias, J. & Balmford, A. (1999). Deforestation and bird extinctions in the Atlantic forest. *Animal Conservation*, 2(3): 211-222.
- Colwell, R. K., & Coddington J. A. (1994). Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 345(1311): 101-118.
- Colwell, R.K. (2019). *EstimateS: Statistical Estimation of Species Richness and Shared Species from Samples*. Version 9 [Consulted: 15.viii.2021]. <<http://viceroy.ceb.uconn.edu/estimates/>>.
- De Egea, J. & Balbuena, C. (2011). *Adopción de los Criterios de Altos Valores de Conservación de Recursos Naturales en la Reserva San Rafael*. Asunción: World Wildlife Found / Guyra Paraguay. 130 pp.
- Del Castillo, H., Clay, R., Lesterhuis A. & Smith, P. (2015). *Species lists of birds for South American countries and territories: Paraguay*. Version 2. [Consulted: 15.vii.2021]. <<http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/>>.

[SACCCountryLists.htm](#)>.

- Del Castillo, H. & Clay, R.P. (2004). *Lista comentada de las aves de Paraguay*. Asunción: Guyra Paraguay. 200 pp.
- Esquivel, A., Velazquez M.C., Bodrati A., Fraga R., Del Castillo H., Klavins J., Clay R.P., Madroño A. & Peris, S.J. (2007). Status of the avifauna of San Rafael National Park, one of the last large fragments of Atlantic Forest in Paraguay. *Bird Conservation International*, 17(4): 301–317.
- Esquivel, A. & Peris, S. (2012). Estructura y organización de una comunidad de aves del Bosque Atlántico de San Rafael, Paraguay. *Ornitología Neotropical*, 23: 569–584.
- Esquivel, A., Zarza, R., Tiffer-Sotomayor, R., Díaz, A., Pérez, D. & Velázquez, M. (2019). Conservation Status and Challenges of the Atlantic Forest Birds of Paraguay. *Diversity*, 11(12)247: 1–42.
- Herzog, S., Kessler, M. & Cahill, T. M. (2002). Estimating species richness of Neotropical bird communities from rapid assessment data. *The Auk*, 119(3): 749–769.
- Mackinnon, J. & Phillips, K. (1993). *A field guide to the birds of Borneo, Sumatra, Java and Bali: the Greater Sunda Islands*. Oxford: Oxford University Press. xvi + 491 pp.
- MADES [Ministerio Del Ambiente Y Desarrollo Sostenible]. (2019). *Resolución N° 254/19, según la cual se actualiza el listado de las especies protegidas de la vida silvestre de la clase Aves*. 2 + 8 pp.
- Moreira-Lima, L. (2013). *Aves da Mata Atlântica: riqueza, composição, status, endemismos e conservação*. Masters Dissertation. São Paulo: Universidade de São Paulo. 513 pp.
- Moreira-Lima, L. & Silveira, L. (2018). *Aves da Mata Atlântica*. Pp. 365–389, in Monteiro-Filho, E.L.A. & Conte, C.E. (Eds.). *Revisoes em Zoologia: Mata Atlântica*. Curitiba: Editora UFPR. 490 pp.
- Moreno, C.E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. M&T - Manuales & Tesis SEA, 1. Zaragoza: Sociedad Entomológica Aragonesa / Gorfi. 84 pp.
- Morales, I. (2018). *Complementariedad de aves en Áreas naturales protegidas y hábitats importantes para su conservación en Veracruz*. Tesis de Especialización. Tuxpan: Universidad Veracruzana. 86 pp.
- O’dea, N., Watson, J.E.M. & Whittaker, R.J. (2004). Rapid assessment in conservation research: a critique of avifaunal assessment techniques illustrated by Ecuadorian and Madagascan case study data. *Diversity and Distributions*, 10(1): 55–63.
- Peralta, N., Pérez, L. & Amarilla, S. (2018). Análisis estructural de un bosque de la Ecorregión Alto Paraná, Paraguay. *Investigación Agraria*, 20(2): 127–135.
- Quintana, M., Duré, R. & Barreto R. (2002). *Comunidades Naturales y Flora*. pp. 12–49, in SEAM, CDC & MNHNP. (Eds.). *Evaluación Ecológica Rápida: Reserva San Rafael*. Asunción: Proyecto PAR/94/001/PNUD/DINCAP/MAG.
- Fundación Moisés Bertoni. (2007). *Biodiversidad del Paraguay, una aproximación a sus realidades*. 1ª Ed. Asunción: Fundación Moisés Bertoni / USAID / GEF/ BM. 255 pp.
- Smith, P., Sidelnik, M., Tirados, I. & Ríos, S. (2021). Some ornithological observations of interest from Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael, Itapúa department, Paraguay. *Paraquaria Natural*, 8: 15–18.

Anexo 1

A. Riqueza y taxonomía de las especies registradas en los sitios de estudio. **Referencia:** Categorizada según **MADES:** Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019). **UICN:** Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (2021).

Especies	Sitios	MADES	UICN
ACCIPITRIFORMES			
ACCIPITRIDAE			
<i>Accipiter striatus</i>	7		
<i>Circus buffoni</i>	2, 17		
<i>Ictinia plumbea</i>	3		
<i>Rupornis magnirostris</i>	1, 3, 10, 14, 15, 22		
ANSERIFORMES			
ANATIDAE			
<i>Amazonetta brasiliensis</i>	1		
APODIFORMES			
APODIDAE			
<i>Chaetura meridionalis</i>	22		
TROCHILIDAE			
<i>Anthracothorax nigricollis</i>	17		
<i>Chlorostilbon lucidus</i>	2, 15, 17		
<i>Chrysuronia versicolor</i>	13		
<i>Phaethornis eurynome</i>	14, 22	AE	
<i>Thalurania furcata</i>	21		
CATHARTIFORMES			
CATHARTIDAE			
<i>Cathartes aura</i>	10, 14, 20		
<i>Coragyps atratus</i>	3, 9, 11, 14, 16		
CHARADRIIFORMES			
CHARADRIIDAE			
<i>Vanellus chilensis</i>	1, 2, 3, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20		
JACANIDAE			
<i>Jacana jacana</i>	7		
SCOLOPACIDAE			
<i>Gallinago paraguayae</i>	1		
CICONIIFORMES			
CICONIIDAE			
<i>Mycteria americana</i>	9		

Anexo 1 (continuación)

Especies	Sitios	MADES	UICN
COLUMBIFORMES			
COLUMBIDAE			
<i>Columbina picui</i>	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 17, 20		
<i>Columbina squammata</i>	3, 17		
<i>Columbina talpacoti</i>	1, 3, 7, 8, 9, 10, 11		
<i>Leptotila rufaxilla</i>	1, 3, 15		
<i>Leptotila verreauxi</i>	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21		
<i>Patagioenas cayennensis</i>	6		
<i>Patagioenas picazuro</i>	3, 13, 14		
<i>Zenaida auriculata</i>	1, 2, 3, 7, 9, 10, 11, 14, 17, 18, 20		
CORACIIFORMES			
ALCEDINIDAE			
<i>Chloroceryle americana</i>	1, 7		
<i>Megaceryle torquata</i>	1, 7		
BUCCONIDAE			
<i>Nystalus chacuru</i>	7		
MOMOTIDAE			
<i>Baryphthengus ruficapillus</i>	13		
CUCULIFORMES			
CUCULIDAE			
<i>Coccyzus melacoryphus</i>	1, 7		
<i>Crotophaga ani</i>	1, 2, 3, 7, 9, 10, 14, 17		
<i>Guira guira</i>	1, 2, 3, 7, 9, 10, 18, 19		
<i>Piaya cayana</i>	3, 10, 11, 13, 14, 17		
<i>Tapera naevia</i>	3, 12		
FALCONIFORMES			
FALCONIDAE			
<i>Caracara plancus</i>	10, 14		
<i>Milvago chimachima</i>	1		
<i>Milvago chimango</i>	3, 5, 14		
GRUIFORMES			
RALLIDAE			
<i>Aramides saracura</i>	2, 17	AE	
<i>Mustelirallus albicollis</i>	1		

Anexo 1 (continuación)

Especies	Sitios	MADES	UICN
PASSERIFORMES			
CARDINALIDAE			
<i>Cyanoloxia brissonii</i>	3		
<i>Habia rubica</i>	21, 22		
CONOPOPHAGIDAE			
<i>Conopophaga lineata</i>	13, 18, 19	AE	
CORVIDAE			
<i>Cyanocorax chrysops</i>	3, 5, 21		
FORMICARIIDAE			
<i>Chamaeza campanisona</i>	5, 6	AE	
FRINGILLIDAE			
<i>Chlorophonia cyanea</i>	22		
<i>Euphonia chlorotica</i>	3, 7, 9, 17		
<i>Euphonia pectoralis</i>	13		
<i>Spinus magellanicus</i>	1, 17		
FURNARIIDAE			
<i>Anabacerthia lichtensteini</i>	21, 22	AE	
<i>Automolus leucophthalmus</i>	2, 6, 21, 22	AE	
<i>Furnarius rufus</i>	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 17, 18, 20		
<i>Lochmias nematura</i>	9	AE	
<i>Nemosia pileata</i>	18		
<i>Schoeniophylax phryganophilus</i>	1, 2, 7		
<i>Sittasomus griseicapillus</i>	5, 13, 22		
<i>Synallaxis cinerascens</i>	3, 5, 14, 22	AE	
<i>Synallaxis ruficapilla</i>	3, 13, 22	AE	
<i>Synallaxis spixi</i>	6, 9, 16		
<i>Syndactyla rufosuperciliata</i>	8		
<i>Xenops rutilans</i>	21		
<i>Xiphorhynchus fuscus</i>	22	AE	
GRALLARIIDAE			
<i>Grallaria varia</i>	6, 14	AE	
HIRUNDINIDAE			
<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	2, 3, 9, 17		
<i>Progne chalybea</i>	2, 3, 7, 18		
<i>Progne tapera</i>	2, 3, 7, 8, 9, 13, 16, 17		

Anexo 1 (continuación)

Especies	Sitios	MADES	UICN
ICTERIDAE			
<i>Cacicus chrysopterus</i>	8		
<i>Cacicus haemorrhous</i>	1, 3, 7, 21		
<i>Gnorimopsar chopi</i>	1, 17		
<i>Icterus pyrrhopterus</i>	5, 12		
<i>Leistes superciliaris</i>	1, 14		
<i>Molothrus bonariensis</i>	3		
<i>Molothrus rufoaxillaris</i>	6, 7		
<i>Pseudoleistes guirahuro</i>	1, 7, 14		
<i>Pseudoleistes virescens</i>	22		
MIMIDAE			
<i>Mimus saturninus</i>	1, 3, 7, 8, 9, 10, 17		
PARULIDAE			
<i>Basileuterus culicivorus</i>	3, 4, 5, 6, 7, 13, 14, 21, 22		
PARULIDAE			
<i>Geothlypis aequinoctialis</i>	1, 9		
<i>Myiothlypis leucoblephara</i>	2, 3, 4, 5, 7, 10, 13, 14, 15, 18, 21, 22		
<i>Setophaga pitiayumi</i>	3, 4, 5, 6, 7, 20, 21		
PASSERELLIDAE			
<i>Ammodramus humeralis</i>	1		
<i>Arremon flavirostris</i>	5		
<i>Zonotrichia capensis</i>	3, 6, 16, 17, 19		
PASSERIDAE			
<i>Passer domesticus</i>	2		
PIPRIDAE			
<i>Chiroxiphia caudata</i>	3, 4, 5, 9, 22	AE	
POLIOPTILIDAE			
<i>Polioptila dumicola</i>	1, 3, 9, 17		
THAMNOPHILIDAE			
<i>Dryophila malura</i>	3, 16		
<i>Dysithamnus mentalis</i>	3, 5, 13, 14, 21		
<i>Herpsilochmus rufimarginatus</i>	6		
<i>Hypoedaleus guttatus</i>	6, 13	AE	
<i>Mackenziaena leachii</i>	2, 3, 5, 17	AE	
<i>Mackenziaena severa</i>	3, 13, 16, 22	AE	
<i>Pyriglena leucoptera</i>	13, 21, 22	AE	

Anexo 1 (continuación)

Especies	Sitios	MADES	UICN
<i>Terenura maculata</i>	22	AE	
<i>Thamnophilus caerulescens</i>	2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 17, 18, 21		
<i>Thamnophilus doliatus</i>	3, 12		
THRAUPIDAE			
<i>Conirostrum speciosum</i>	7, 22		
<i>Coryphospingus cucullatus</i>	2, 3, 5, 6, 7, 10		
<i>Embernagra platensis</i>	1		
<i>Hemithraupis guira</i>	5, 6, 13, 21, 22		
<i>Nemosia pileata</i>	3		
<i>Paroaria coronata</i>	1, 7, 11, 17		
<i>Saltator similis</i>	2, 3, 7, 16, 17, 18		
<i>Sicalis flaveola</i>	1, 7, 9, 17, 20		
<i>Sporophila angolensis</i>	9		
<i>Sporophila caerulescens</i>	1, 3, 9, 17		
<i>Tachyphonus coronatus</i>	13, 17		
<i>Tersina viridis</i>	2, 3		
<i>Thlypopsis pyrrhocomma</i>	22		
<i>Thraupis sayaca</i>	1, 3, 7, 8, 9, 10, 15, 17, 20, 21		
<i>Trichothraupis melanops</i>	5, 14, 22		
<i>Volatinia jacarina</i>	1, 3, 7, 9, 17		
TITYRIDAE			
<i>Pachyramphus polychopterus</i>	6		
<i>Pachyramphus validus</i>	22		
<i>Schiffornis virescens</i>	4		
<i>Tityra cayana</i>	3, 22		
TROGLODYTIDAE			
<i>Troglodytes aedon</i>	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 13, 16, 19, 20, 21		
TURDIDAE			
<i>Turdus albicollis</i>	4, 5, 14, 21		
<i>Turdus amaurochalinus</i>	3, 5, 7, 9, 10, 12, 16, 19, 20		
<i>Turdus leucomelas</i>	3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 21		
<i>Turdus rufiventris</i>	2, 3, 5, 6, 7, 21, 22		
TYRANNIDAE			
<i>Camptostoma obsoletum</i>	3		
<i>Capsiempis flaveola</i>	2, 5, 9, 13		
<i>Cnemotriccus fuscatus</i>	2, 5, 9, 13		

Anexo 1 (continuación)

Especies	Sitios	MADES	UICN
<i>Corythopsis delalandi</i>	18, 21, 22		
<i>Elaenia flavogaster</i>	1, 3, 6, 9		
<i>Elaenia spectabilis</i>	1, 2, 3, 7, 15, 17		
<i>Empidonomus varius</i>	2, 3, 7, 10, 17		
<i>Gubernetes yetapa</i>	1		
<i>Hemitriccus diops</i>	14	AE	
<i>Hemitriccus margaritaceiventer</i>	6		
<i>Lathrotriccus eulери</i>	6		
<i>Legatus leucophaeus</i>	3, 7		
<i>Leptopogon amaurocephalus</i>	6, 22		
<i>Machetornis rixosa</i>	1, 3, 7, 11, 12, 17, 20		
<i>Megarynchus pitangua</i>	3, 5, 7, 8, 10, 13, 19, 20, 21		
<i>Myiarchus ferox</i>	2, 9		
<i>Myiarchus swainsoni</i>	13		
<i>Myiodynastes maculatus</i>	1, 7, 8, 9, 13, 15, 17, 20		
<i>Myiopagis viridicata</i>	7, 19, 22		
<i>Myiophobus fasciatus</i>	1, 9, 14		
<i>Myiornis auricularis</i>	5, 13, 21	AE	
<i>Phylloscartes eximius</i>	22	AE	NT
<i>Pitangus sulphuratus</i>	1, 2, 3, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 17, 18, 20, 22		
<i>Platyrinchus mystaceus</i>	22		
<i>Poecilotriccus plumbeiceps</i>	18		
<i>Pyrocephalus rubinus</i>	17, 20		
<i>Serpophaga munda</i>	3		
<i>Tolmomyias sulphurescens</i>	22		
<i>Tyrannus melancholicus</i>	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 17, 19		
<i>Tyrannus savana</i>	1, 3, 9, 10, 17		
VIREONIDAE			
<i>Cyclarhis gujanensis</i>	3, 5, 7, 9, 13, 14, 15, 16, 18		
<i>Hylophilus poicilotis</i>	3		
<i>Vireo olivaceus</i>	3, 4, 7, 8		
PELECANIFORMES			
ARDEIDAE			
<i>Bubulcus ibis</i>	12		
<i>Butorides striata</i>	2, 3		
<i>Syrigma sibilatrix</i>	1, 7, 14, 17		

Anexo 1 (final)

Especies	Sitios	MADES	UICN
PICIFORMES			
PICIDAE			
<i>Celeus flavescens</i>	4		
<i>Colaptes campestris</i>	1, 11, 14, 18, 21		
<i>Dryobates spilogaster</i>	5, 7, 13, 14, 18, 21	AE	
<i>Melanerpes candidus</i>	7, 9		
<i>Picumnus cirratus</i>	8		
<i>Picumnus temminckii</i>	3, 5, 7, 21	AE	
RAMPHASTIDAE			
<i>Pteroglossus castanotis</i>	3, 13		
<i>Selenidera maculirostris</i>	22	AE	
PODICIPEDIFORMES			
PODICIPEDIDAE			
<i>Tachybaptus dominicus</i>	3		
PSITTACIFORMES			
PSITTACIDAE			
<i>Amazona vinacea</i>	5	EN	EN
<i>Brotogeris chiriri</i>	3		
<i>Myiopsitta monachus</i>	1, 3, 7, 9, 10, 14, 18, 21		
<i>Pionopsitta pileata</i>	3, 6, 13	AE	
<i>Pionus maximiliani</i>	3, 13, 22		
<i>Pyrrhura frontalis</i>	9, 13		
STRIGIFORMES			
STRIGIDAE			
<i>Athene cunicularia</i>	14, 20		
TINAMIFORMES			
TINAMIDAE			
<i>Crypturellus obsoletus</i>	5	AE	
<i>Crypturellus tataupa</i>	5, 13, 21		
<i>Nothura maculosa</i>	3, 14		
<i>Rhynchotus rufescens</i>	1, 14		
TROGONIFORMES			
TROGONIDAE			
<i>Trogon rufus</i>	6	AE	
<i>Trogon surrucura</i>	1, 4		

Validación de una metodología analítica para la cuantificación de la ciprofloxacina en huevos de gallinas mediante HPLC

Validation of an analytical methodology for the quantification of ciprofloxacin in chicken eggs by HPLC

Julio César Benítez-Villalba^{1,*}, Martiniano Barrios¹ & Mercedes Benítez-Peña¹

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, San Lorenzo, Paraguay.

*Autor correspondiente: juliobenitez@facen.una.py.

Resumen: La ciprofloxacina es un antibiótico del grupo de las fluoroquinolonas utilizadas en medicina humana y veterinaria. Este compuesto posee unas características que hacen que la resistencia de las bacterias a las mismas sea reducida, sin embargo, el amplio uso que ello se utiliza en veterinaria puede propiciar que los residuos de los mismos se incorporen en la cadena alimentaria. Por estas razones, el uso de la mayoría de los antibióticos está regulado por diferentes organismos tanto nacionales como internacionales. En este trabajo de investigación se ha desarrollado y validado una metodología analítica para la determinación y cuantificación de este antibiótico en huevos de gallina que son comercializados en la Gran Asunción. Se ha utilizado la cromatografía de líquidos de alta resolución HPLC-FLD, previamente extracción del analito a partir de la técnica de extracción líquido-líquido. Como columna cromatográfica se utilizó Zorbax C18 (250 mm x 4.5 mm x 5 µm) a una temperatura de 30°C. La detección se realizó con fluorescencia a longitudes de onda de 294 nm (excitación) 500 nm (emisión), empleando una fase móvil de Acetonitrilo:Agua ácido cítrico 50 mM, trietilamina pH 4 (10:90) en modo isocrático. El método analítico ha demostrado ser altamente sensible, con límite de detección inferior a 0,18 µg.g⁻¹. Los resultados comprueban la presencia de este contaminante a concentraciones entre 40.34 y 46.09 µg/Huevo. Los datos obtenidos servirán para sentar un precedente y generar datos de información científica y estadísticamente validadas, que podrá ser útil para dar a conocer a la comunidad científica.

Palabras clave: *Ciprofloxacina, Huevos, Cromatografía de líquido de alta resolución HPLC-DAD.*

Abstract: Ciprofloxacin is a fluoroquinolone antibiotic used in human and veterinary medicine. This compound has some characteristics that make the resistance of the bacteria to them is reduced, however, the wide use that it is used in veterinary medicine can lead to their residues being incorporated into the food chain. For these reasons, the use of most antibiotics is regulated by different national and international organizations. In this research work, an analytical methodology for the determination and quantification of this antibiotic in chicken eggs that are marketed in Greater Asunción has been developed and validated. HPLC-FLD high resolution liquid chromatography has been used, previously extracting the analyte from the liquid-liquid extraction technique. As a chromatographic column, Zorbax C18 (250 mm x 4.5 cm x 5 µm) was taken out at a temperature of 30°C. Detection was performed with fluorescence at wavelengths of 294 nm (excitation) 500 nm (emission), using a mobile phase of Acetonitrile:Water 50 mM citric acid, triethylamine pH 4 (10:90) in isocratic mode. The analytical method has proven to be highly sensitive, with a detection limit of less than 0.18 µg.g⁻¹. The results prove the presence of this contaminant at concentrations between 40.34 and 46.09 µg/Egg. The data obtained will serve to sit down without precedent and generate scientific and statistically validated information data, which may be useful to inform the scientific community.

Key words: *Ciprofloxacin, Eggs, HPLC-DAD High Performance Liquid Chromatography.*

Introducción

Los peligros para la salud humana originados por los productos alimentarios pueden derivar de las materias primas utilizadas, de la manipulación y de todas las fases de elaboración, transporte, almacenamiento y venta de los alimentos (Botsoglou

& Fletouris, 2001; Fajardo *et al.*, 2011). Entre los principales peligros figuran la contaminación microbiana, los aditivos alimenticios, los contaminantes ambientales y los residuos de plaguicidas y de medicamentos de uso veterinario (Montalvo *et al.*, 2004; Takeda & Akiyama, 1991). Los residuos

Recibido: 11/08/2022 Aceptado: 14/04/2023



de antibióticos en alimentos de origen animal pueden provocar reacciones alérgicas en individuos hipersensibles, pero, sobre todo, la administración de bajos niveles de antibióticos puede dar lugar a bacterias resistentes, que pueden llegar al ser humano a través de dichos alimentos (Cancho *et al.*, 2000; García *et al.*, 2005). Por todas estas razones los organismos encargados de la vigilancia de la salud pública, en muchos países, han desarrollado normativas de control de los Límites Máximos de Residuos (LMR) en tejidos animales destinados al consumo humano. El LMR representa aquella concentración permitida de un principio activo en alimentos de origen animal (músculo, hígado, riñón, grasa, leche, huevo, etc.) que al ser ingerida por el ser humano no constituye ningún riesgo para su salud (Alm El Dein & Elhearon, 2010; Farré & Barceló, 2012).

La contaminación, de los alimentos de consumo humano, se venía produciendo de manera natural, pero con la necesidad de las nuevas prácticas y de nuevos procedimientos industriales, han ido apareciendo nuevos tipos de contaminación, la seguridad de los alimentos que consumimos se ha convertido en una prioridad fundamental tanto para los consumidores como para las industrias productoras, esta atención denota la cobertura de las necesidades alimentarias de la población con productos de valor nutricional adecuado y en un rango de costes asumible (Montalvo *et al.*, 2004; Mottier *et al.*, 2003).

El uso de los antibióticos en veterinaria para el tratamiento de enfermedades en el ganado y sector avícola destinado al consumo humano, así como su utilización como aditivos en granjas industriales, han dado como resultado que deba considerarse su presencia potencial en alimentos de origen animal, cuando se utilizan de forma fraudulenta, indiscriminada y abusiva, existe la posibilidad de que residuos de dichos compuestos persistan en el alimento y pasen a la cadena de alimentación humana (Yorke & Froc, 2000; Verdon *et al.*, 2005). Pero como ocurre en medicina humana, los antibióticos son empleados en veterinaria con la finalidad no sólo de curar (terapéutica), sino también de prevenir

enfermedades (Stolker & Brinkman, 2005; Baliz & Hewitt, 2003). Además, en el caso de la veterinaria, los antibióticos son empleados como promotores del crecimiento, así como en horticultura y en agricultura. Los antibióticos pueden mejorar los rendimientos de la explotación ganadera, al incrementar la ganancia de peso y el índice de conversión de los alimentos, que van desde un 3-5% en pollos, un 4-5% en cerdos y terneros, hasta más de un 10% en vacuno de carne (Yoshida *et al.*, 2009; Butaye *et al.*, 2003).

Unos de los antibióticos utilizado de uso veterinario y en seres humano es la **Ciprofloxacina** (Gorla *et al.*, 1997; Nadezhda *et al.*, 2012). Este compuesto pertenece a la clase de antibiótico llamada fluoroquinolona de la segunda generación y posee un amplio espectro de acción, según el nivel de actividad se lo utiliza para tratar o prevenir determinadas infecciones bacterianas. Su nombre químico es 1-ciclopropil-6-fluoro-1,4-dihidro-4-oxo-7-(1-piperazinil)-3-quinolinocarboxílico-clorhidrato (Griggs *et al.*, 2005; Macarov *et al.*, 2012). Tiene la siguiente estructura química que vemos en la Figura 1.

Su fórmula molecular es $C_{17}H_{18}FN_3O_3 \cdot HCl$, posee un peso molecular de 367.82 g/mol (Gorla *et al.*, 1997; Griggs *et al.*, 2005). La Ciprofloxacina en su estado puro es un polvo de color amarillo pálido, ligeramente higroscópico y cristalino; soluble en agua y muy ligeramente en alcohol deshidratado, ligeramente soluble en metanol, es prácticamente insoluble en acetona, diclorometano y en acetato de etilo. En una solución de 2.5 % en agua tiene

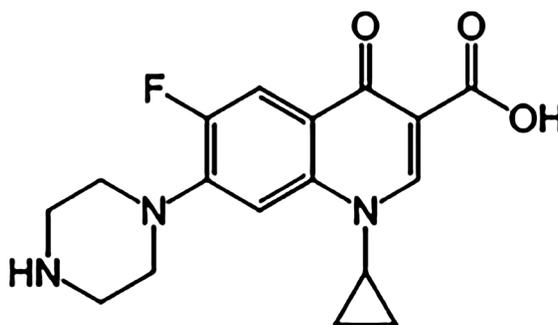


Figura 1. Estructura química de la Ciprofloxacina Clorhidrato.

un pH de 3.5 a 4.5 (Griggs *et al.*, 2005; Sorensen *et al.*, 1999). En las aves, pollos de engorde y pavos, actúa contra enfermedades causadas por microorganismos Gram positivos, Gram negativos y *Mycoplasmas* susceptibles a la Ciprofloxacina como neumonía e infecciones gastrointestinales (Gharieb & Atti, 2011; Kowalski, 2008). En este trabajo de investigación se ha desarrollado y validado una metodología analítica para la determinación y cuantificación de la Ciprofloxacina en huevos de gallinas que son comercializados en la zona metropolitana de Asunción utilizando para ello la cromatografía de líquido de alta resolución HPLC y la extracción líquido-líquido para extraer el analito de la matriz.

Materiales y métodos

Productos químicos y reactivos

Para los ensayos correspondientes se han utilizado reactivos de grado analítico. El patrón de Ciprofloxacina fue suministrado por la casa comercial Sigma-Aldrich (St. Louis, MO). La solución madre del analito fue preparada una sola vez a una concentración de 500 $\mu\text{g. mL}^{-1}$ y fue almacenado a -20°C en una botella de vidrio oscuro. El acetonitrilo que se utilizó para la preparación de la fase móvil y la extracción del analito fue de grado cromatográfico de la marca J.T. Baker (CAS N° 75-05-8), el agua destilada utilizada fue obtenida del equipo (QUIMIS, Brasil) y posteriormente purificada en un equipo Barnstead™ MicroPure™. La Trietilamina de la marca Fluka (CAS: 121-44-8), el acetato amónico (CAS 631-61-8) de la Marca Merck, el ácido fosfórico (CAS: 7664-38-2) Merck de 85% de pureza, ácido acético de la marca Merck (CAS 64-19-7).

Instrumentación y software

Para la extracción de la Ciprofloxacina de la matriz estudiada se utilizó una la técnica de extracción líquido-líquido, también conocida como extracción con solventes o extracción con disolventes, para ello se utilizó una variedad de materiales de vidriería como vasos de precipitados, embudos, varilla de vidrio entre otros. Un vortex marca LW Scientific y una centrífuga de mesa de la marca Presvac DCS-16

RV. Para la detección y cuantificación del analito se utilizó un cromatógrafo líquido de alta resolución HPLC – FLD. La detección se realizó con fluorescencia a longitudes de onda de 294 nm (excitación) 500 nm (emisión). La separación cromatográfica del analito en estudio se obtuvo utilizando una columna ZORBAX Eclipse XDB-C18 (4.6 mm \times 150 mm; 5 μm). El manejo del instrumento, la detección de los picos y la integración de los mismos se llevaron a cabo utilizando el software LCsolution.exe (versión 1.0). Se utilizó una balanza analítica RADWAG (modelo 310.R2) made in Polan (EU) para realizar el peso del estándar, reactivos y las muestras. Se utilizó un software Statgraphics Plus versión 5.0 (Manugistics, Rockville, MD, EE. UU., 2000) para el tratamiento estadístico de los datos. Paquetes Microsoft® Office: Word®, Excel® y PowerPoint® 2010.

Toma y Preparación de las Muestras

La técnica de muestreo utilizada fue el no probabilístico del tipo conveniencia. Los huevos de gallinas fueron muestreados de supermercados que se encuentran en el área metropolitana de Asunción, se adquirieron tres diferentes marcas comerciales y huevos de procedencia casera que se utilizó como blanco. Cada muestra contó con 6 huevos que fueron tratadas. Primeramente, se determinó la cantidad del contenido por cada huevo y el promedio total por marca, luego se realizó un pull de cada marca agregando las yemas y las claras en un recipiente. Una vez determinada el contenido de cada huevo, el promedio y el pull de todas las marcas, se traspasó en tubos Falcon (Fig. 2), se identificaron las marcas y fueron guardadas en el refrigerador a una temperatura de 4°C para evitar su descomposición hasta el momento de su análisis.

La técnica de extracción utilizada fue la de líquido-líquido. Se pesó 1 gramo de cada pull de las marcas de huevos estudiadas, todas por triplicado. A cada muestra de le adicionó 4 mL de una solución de ácido acético/etanol absoluto, en una proporción 1:99 y fueron agitadas durante 5 minutos en un vortex. Posteriormente se le agregó 500 μL de ACN y se agitaron otros 5 minutos. El extracto

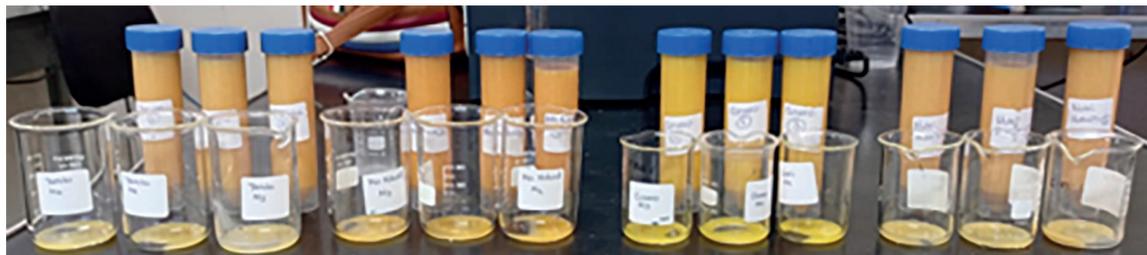


Figura 2. Muestras preparadas para la extracción líquido-líquido.

fue centrifugado durante 20 minutos a 3220 g el sobrenadante fue filtrado por filtro minisart de 0,45 μm y traspasadas a un vial de vidrio de HPLC para su posterior lectura cromatográfica.

Preparación de las muestras patrones

Primeramente, se preparó una disolución patrón de Ciprofloxacina a partir de 50 mg que se disolvieron en un matraz de 100 mL (500 $\mu\text{g/mL}$) con fase móvil, seguidamente se traspasaron 10 mL a un matraz de 100 mL (50 $\mu\text{g/mL}$) a partir de esta última disolución patrón se prepararon 6 disoluciones más diluidas de concentraciones 1, 2, 4, 6 y 8 $\mu\text{g/mL}$ (3 réplicas por cada nivel):

- 2 mL de solución patrón de Ciprofloxacina de 50 $\mu\text{g/mL}$ en 100 mL con fase móvil (1 $\mu\text{g/mL}$).
- 4 mL de solución patrón de Ciprofloxacina de 50 $\mu\text{g/mL}$ en 100 mL con fase móvil (2 $\mu\text{g/mL}$).
- 4 mL de solución patrón de Ciprofloxacina de 50 $\mu\text{g/mL}$ en 50 mL con fase móvil (4 $\mu\text{g/mL}$).
- 6 mL de solución patrón de Ciprofloxacina de 50 $\mu\text{g/mL}$ en 50 mL con fase móvil (6 $\mu\text{g/mL}$).
- 8 mL de solución patrón de Ciprofloxacina de 50 $\mu\text{g/mL}$ en 50 mL con fase móvil (8 $\mu\text{g/mL}$).

Optimización de las condiciones cromatográficas HPLC

Para la optimización del método cromatográfico del HPLC se empleó una disolución de la Cipro-

floxacina en fase móvil a una concentración de 6 $\mu\text{g/mL}$. En primer lugar, se fijó la detección del analito en el equipo que fue del tipo fluorescencia a unas longitudes de onda de excitación de 294 nm y de emisión 500 nm. En el desarrollo de la metodología propuesta se empleó la cromatografía en fase reversa (fase estacionaria menos polar que la fase móvil). Se seleccionó una columna con relleno ZORBAX Eclipse XDB-C18 (4.6 mm \times 150 mm; 5 μm) de dimensiones y tamaño de partícula; todo ello de acuerdo a la afinidad, la muy buena resolución y las características fisicoquímicas del analito con la misma.

Se ensayaron las principales variables que afectan a la separación cromatográfico y a la intensidad de la señal, se evaluaron diferentes fases móviles de acuerdo a la naturaleza del analito, se ensayaron mezclas de acetonitrilo y una solución acuosa ajustada a pH 4 con ácido cítrico 50 mM y trietilamina, las diferentes proporciones ensayadas fueron (50:50), (30:70) y (10:90). También se evaluó el efecto del caudal, la temperatura de la columna y volúmenes de inyección en la detección de la Ciprofloxacina. Se ensayaron velocidades de flujo isocrático desde 1 a 2,5 mL.min⁻¹; las temperaturas de la columna de 30 °C a 50 °C. Finalmente se evaluó el volumen de inyección desde 5 a 30 μL .

Validación del método analítico

Para la validación del método analítico propuesto en este trabajo de investigación se siguieron las recomendaciones de la “Guía de validación para métodos bioanalíticos” propuesta por la FDA. Los parámetros de validación que fueron evaluados a partir del calibrado son: linealidad, límites de detección y cuantificación, rango dinámico lineal,

sensibilidad analítica y exactitud del método expresada en términos de precisión y veracidad (USP 29, 2005).

Los requisitos de la validación del método analítico se establecieron de la siguiente manera: (a) Linealidad, el coeficiente de determinación (R^2) debe ser igual o mayor que 0,999 y la desviación residual máxima debe ser menor al 25%. (b) La precisión, expresada como desviación estándar relativa DER (precisión entre días) debe ser $\leq 30\%$. (c), la veracidad, expresada como recuperación media, debe estar en el rango 70 a 120%. (d) El límite de cuantificación (LC) debe cumplir con los requisitos (b) y (c). Estos requisitos se ajustan a la Decisión 2002/657 / CE de la Comisión de la Comunidad Europea (Benítez-Villalba *et al.*, 2013).

La calidad, confiabilidad y consistencia de un método analítico validado se determina en base a la sensibilidad, linealidad, límite de detección (LD), límite de cuantificación (LC), exactitud y precisión del analito estudiado. Para ello se han preparado 5 disoluciones estándar partiendo de la solución madre de concentración de 500 $\mu\text{g/mL}$ para obtener otras disoluciones de concentraciones de 1 – 2 – 4 – 6 – 8 y 10 $\mu\text{g/mL}$ utilizando como disolvente la fase móvil detallado su preparación en el ítem **Preparación de las muestras patrones**. Cada parámetro de validación se define como sigue: **linealidad** que es la capacidad de un método analítico de obtener resultados proporcionales a la concentración del o los analitos en una muestra dentro de un intervalo determinado; **límite de detección LD** es la cantidad más baja del analito en una muestra que puede ser detectada por una única medición, con un nivel de confianza determinado, pero no necesariamente cuantificada con un valor exacto; **límite de cuantificación LC** es la cantidad más baja de un analito en una muestra que puede ser cuantitativamente determinada con exactitud aceptable; **Rango Dinámico Lineal (RDL)** es la que se establece como el intervalo de concentraciones que comprenden entre el límite de cuantificación de los métodos y el límite superior del intervalo de concentraciones en el que se ha aplicado al método analítico (IUPAC 1978); **la**

sensibilidad analítica de un método analítico o sensibilidad de la calibración mide la relación entre la señal instrumental y la concentración del analito, y viene dada por la pendiente de la recta de calibración (González *et al.*, 1996); **la exactitud** es la cercanía del acuerdo entre el valor que se acepta ya sea como un valor verdadero convencional o un valor de referencia aceptado y el valor encontrado; y la precisión es la cercanía del acuerdo entre una serie de mediciones obtenidas de múltiples muestras de una homogénea muestra en las condiciones prescritas.

Los parámetros de validación fueron calculados de la siguiente manera: **la linealidad** se calculó a partir de seis concentraciones de los estándares en un rango de concentración de 1 - 10 $\mu\text{g/mL}$; para evaluar la linealidad, se construyó un gráfico de la señal producida por el analito en función de la concentración del mismo y la regresión lineal se calculó por el método de los mínimos cuadrados. Calculando el coeficiente de correlación y el intercepto para la Ciprofloxacina. **El límite de detección** se determinó mediante la fórmula $LD = 3.3 \times S_o$ y el **Límite de cuantificación** se determinó mediante la fórmula $LC = 10 \times S_o$, donde

$$S_o = \frac{S_{y/x}}{b} \sqrt{\frac{n-2}{n-1}}$$

($S_{y/x}$ = desviación estándar de la regresión, b = pendiente, n = puntos de calibración (Benítez-Villalba *et al.*, 2018).

El **Rango Dinámico Lineal (RDL)** se estableció entre el límite de cuantificación del método y el límite superior del intervalo de concentraciones en la que fue aplicado al método. **La sensibilidad de un método analítico o sensibilidad** de la calibración se propuso como la sensibilidad analítica ($S_{\text{Analítica}}$) que se calcula por el cociente entre la desviación estándar de la regresión ($S_{y/x}$) y la pendiente del calibrado (b), según la ecuación $S_{\text{Analítica}} = S_{y/x} / b$ (Benítez-Villalba *et al.*, 2021; Mandel & Stiehler, 1954).

Exactitud del Método, Precisión y Veracidad, para establecer la exactitud del método propuesto, se ha estudiado la veracidad del mismo en términos de recuperación con muestras dopadas y su

Fase estacionaria	Zorbax (C18) 250 mm x 4.5 mm x 5 µm
Fase móvil	Acetonitrilo:Agua ácido cítrico 50 mM, ajustado a pH 4 con trietilamina (10:90)
Modalidad	Isocrática
Flujo	2 mL/min
Volumen de inyección	20 µL
Temperatura de la columna	30 °C
Detección	Fluorescencia: 294 nm (excitación) 500 nm (emisión)

Tabla 1. Valores óptimos de las condiciones cromatográficas.

precisión en términos de variabilidad inter e intra-día. Para el estudio de exactitud del método en términos de veracidad se llevó a cabo un estudio de recuperación a tres niveles de concentración (4, 6, 8 µg/mL).

Las muestras fueron analizadas empleando el procedimiento operatorio descrito a lo largo del artículo y la concentración del analito se determinó por interpolación a la curva de calibrado dentro del rango dinámico lineal. Los valores de recuperación se obtuvieron por comparación con la cantidad de analito que fue añadida a las muestras de huevo casero (blanco), previamente fueron cuantificada la Ciprofloxacina realizando todo el procedimiento de extracción (Benítez Villalba *et al.*, 2018). Cada analito se expresó como porcentaje y se calculó mediante la ecuación: recuperación (%) = $S1 / (S2 + S3) \times 100$, donde S1 = cantidad encontrada (µg/mL) en la muestra enriquecida, S2 = cantidad presente originalmente en la muestra no enriquecida, y S3 = cantidad (µg/mL) de analito agregado a la muestra.

Para evaluar la exactitud del método en términos de **precisión**, se estudió la repetibilidad (precisión “intra-día”) y la reproducibilidad (precisión “inter-día”) (Benítez Villalba *et al.*, 2013). Para ello, se realizaron diversas réplicas de los análisis llevados a cabo en el estudio de veracidad, durante un mismo día y durante tres días consecutivos. Cada muestra dopada o enriquecida fue extraída y analizada por triplicado (previamente cuantificada la Ciprofloxacina), es decir tres réplicas de cada punto en el mismo día para evaluar la variabilidad “intra-día” y se repitió en tres días consecutivos para evaluar

la precisión, expresada como desviación estándar relativa (DER) (Norma ISO 5725 1994; European Commissio, 2002; Massart *et al.*, 1997).

Resultados y discusión

Condiciones del cromatográficas HPLC

De las condiciones cromatográficas que fueron optimizadas en el cromatógrafo de líquidos de alta resolución HPLC la fase móvil seleccionada fue el Acetonitrilo : Agua ácido cítrico 50 mM, ajustado a pH 4 con trietilamina (10:90) por dar una muy buena señal analítica; la velocidad de flujo óptimo fue el de 2 mL/min ya que mejoró significativamente la resolución y la forma del pico, la intensidad de respuesta y tiempo de retención; la temperatura optima de la columna fue 30 °C que mostró una muy buena forma del pico mientras que el volumen de inyección optimo fue de 20 µL y la detección fluorescencia fue de 294 nm (excitación) 500 nm (emisión). Los resultados de los valores óptimos se pueden observar en la Tabla 1 así como el cromatograma obtenido a partir de estas condiciones óptimas en la Fig. 3.

Validación del método analítico

A continuación, se detallan los resultados obtenidos de la validación del método analítico para la determinación y cuantificación de la Ciprofloxacina en muestras de huevos que son comercializados en centros comerciales de la Gran Asunción. Se realizó la extracción del analito mediante la técnica de extracción líquido-líquido; a continuación, la validación del método analítico y seguido la detección

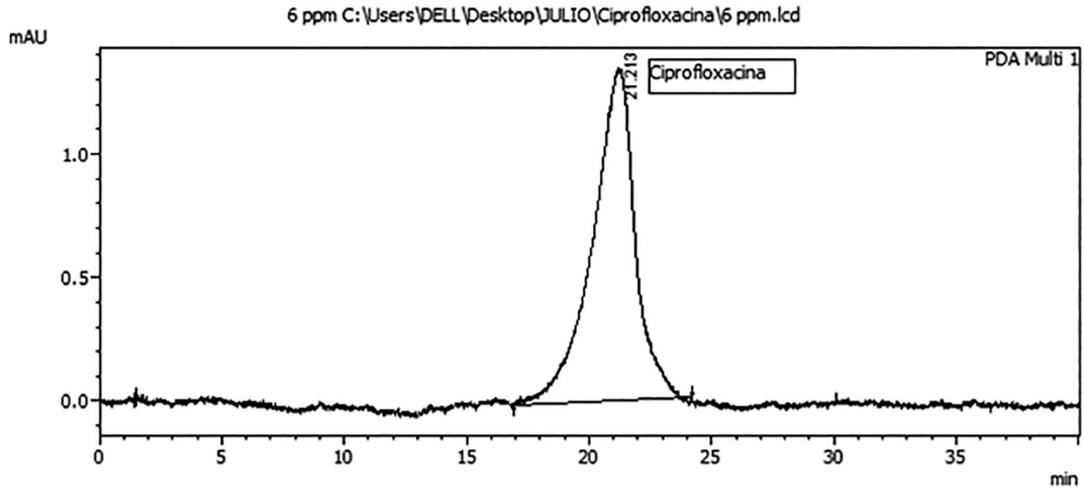


Figura 3. Cromatograma de la Ciprofloxacina con las condiciones óptimas estándar 6 mg/mL.

y cuantificación de la Ciprofloxacina por la técnica de cromatografía de líquido de alta resolución HPLC. En la Tabla 2 se observan los resultados de los parámetros de calibración de la técnica analítica en estudio, donde R^2 (%) es el coeficiente de correlación, n = puntos de calibración, b = pendiente, S_b = desviación estándar de la pendiente, a = intercepto, S_a = desviación estándar del intercepto,

Tabla 2. Parámetros de calibración en la técnica analítica HPLC.

Linealidad	
Ecuación de la recta	$Y=27342*X - 2772.4$
R^2 (%)	99.95
n	15
b ($\mu\text{g/mL}$)	27339.4
S_b	845.816
A	-2768.450
S_a	171.937
$S_{y/x}$	1705.550
%plof	0.978
LD($\mu\text{g/mL}$)	0.180
LC($\mu\text{g/mL}$)	0.601
Sensibilidad	0.0624
RDL($\mu\text{g/mL}$)	0.601-8

$S_{y/x}$ = desviación estándar de la regresión, % plof = valor P de prueba de falta de ajuste, LD = límite de detección, LC = Límite de cuantificación, RDL = rango dinámico lineal (Benítez Villalba *et al.*, 2013; Mandel & Stiehler, 1954).

Linealidad: Dos aspectos importantes y fundamentales se examinaron en esta validación del método analítico, el **Límite de Detección (LD)** y el **Límite de Cuantificación (LC)** cuyos resultados fueron respectivamente de 0.180 $\mu\text{g/mL}$ y 0.601 $\mu\text{g/mL}$ demostrando en este sentido que en el método propuesto es altamente sensible y puede ser utilizado en la detección y cuantificación del analito en esta matriz. Se detalla también el **Rango Dinámico Lineal (RDL)** del analito en el calibrado que va de 0.601-8 $\mu\text{g/mL}$. El valor obtenido del **Coefficiente de Correlación $\%R^2$** de la curva de calibrado fue de 99.95 demostrando que existe linealidad en los intervalos estudiados; además la **sensibilidad del método analítico** o sensibilidad de la calibración que se ha medido mediante la relación entre señal instrumental y la concentración del analito del rango lineal que viene dada por la pendiente de la recta de calibrado fue de 0.0624 $\mu\text{g/mL}$. En la Figura 4 se observa el gráfico de la curva de calibrado de la Ciprofloxacina.

Exactitud del Método Analítico: se realizó el estudio de recuperación de la técnica analítica de extracción mediante la fortificación de una disolu-

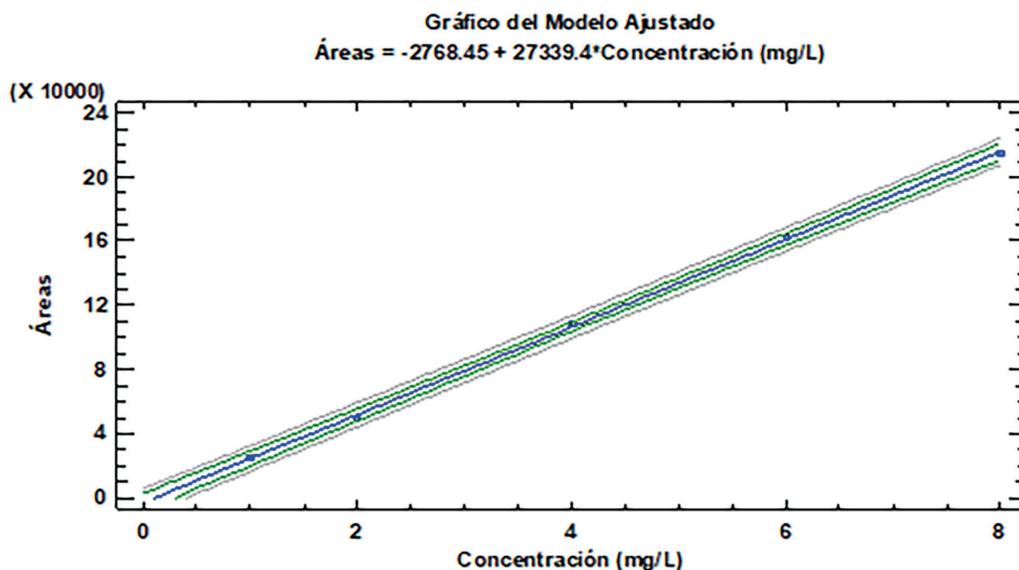


Figura 4. Curva de calibrado de la Ciprofloxacina por HPLC.

ción patrón a las muestras de huevo casero (que previamente analizada no contiene la Ciprofloxacina) a tres niveles de concentración diferentes 4 – 6 y 8 µg/mL (por triplicado). Los cálculos se realizaron de acuerdo a la metodología que está descrito en el ítem de **validación del método analítico**. En las Tablas 3 y 4 se muestran los valores de recuperación obtenidos en esta técnica.

Se logró obtener recuperaciones inter e intra día entre 81% y 85% para la Ciprofloxacina en esta matriz lo que nos lleva a deducir que el procedimiento de extracción es eficiente y el método veraz. Por otro lado, el valor obtenido en esta técnica analítica la DER fue menor al 2%. Este dato se encuentra dentro de los límites aceptables para cumplir los requisitos establecidos en la guía de validación em-

pleada, según la cual se considera aceptable valores iguales o inferiores al 15% en general y al 20 % en la zona próxima al límite de detección del método, por lo que se puede concluir que el método propuesto de la técnica de extracción líquido - líquido cumple con los requisitos de precisión (Cuadros Rodríguez *et al.*, 1993). Se trata por tanto de un método veraz, preciso y por tanto exacto.

Aplicación del método analítico

Al finalizar el desarrollo y la validación del método analítico se procedió a determinar y cuantificar el contenido de la Ciprofloxacina en las muestras de huevos que fueron procesadas de acuerdo a la preparación de las muestras utilizando la curva de calibrado descrito en la metodología. Los resulta-

Tabla 3. Ensayos de recuperación para la determinación de la exactitud en términos de veracidad del método utilizando la técnica de extracción líquido-líquido.

Ensayo Intra - día						
Analito	Dopado µg/mL	Observado µg/mL	DE	Recuperación %	DER %	n
Ciprofloxacina	4	3.39	0.0304	84.75	0.1471	3
	6	4.99	0.0658	83.21	0.0574	3
	8	6.67	0.0075	83.33	0.0357	3

Tabla 4. Ensayos de recuperación para la determinación de la exactitud en términos de precisión del método utilizando la técnica de extracción líquido-líquido.

Ensayo Inter - día						
Analito	Dopado $\mu\text{g.mL}^{-1}$	Observado $\mu\text{g.mL}^{-1}$	DE	Recuperación %	DER %	n
Ciprofloxacina	4	3.2552	1.1279	81.38	0.0371	3
	6	4.9591	1.1811	82.65	1.1344	3
	8	6.4915	1.0932	81.14	1.1092	3

dos obtenidos de la extracción de este analito en las muestras de huevos se pueden observar en la Tabla 5.

Como se puede observar en la Tabla 5, la Ciprofloxacina se encontró y cuantificó en las tres marcas de huevos analizadas que fueron muestreadas en supermercados del Gran Asunción, a unos intervalos de concentraciones comprendidos de 40.34 y 46.09 $\mu\text{g}/\text{Huevo}$, es decir se ha obtenido los siguientes resultados (**Marca 1 = 40.47 $\mu\text{g}/\text{Huevo}$, Marca 2 = 46.09 $\mu\text{g}/\text{Huevo}$ y Marca 3 = 40.34 $\mu\text{g}/\text{Huevo}$**). Por otro lado, el antibiótico objeto de estudio no ha sido detectado en las muestras de huevos caseros, la explicación a este hecho puede radicar en que la Ciprofloxacina se haya metabolizado de forma natural en esta matriz o se encuentre por debajo del

límite de cuantificación o que dicho antibiótico no se encuentre dentro de la dieta del animal en los piensos etc.

Conclusión

La presencia de antibióticos en el medio ambiente y la vida cotidiana se ha convertido en los últimos años en un asunto delicado e importante. La mayor parte de estas sustancias se acumulan en nuestro organismo y entran a través de la medicación y otras veces en la alimentación. Por este motivo es necesario el estudio de estas especies químicas en animales y productos que derivan de ellas ya que estos medicamentos son probablemente uno de los grupos más ampliamente utili-

Tabla 5. Concentración de la Ciprofloxacina encontradas en las muestras. **ND:** no detectado (valor inferior al LD); **D:** detectado, pero no cuantificado (valor entre el LD y el LC).

Concentración de la Ciprofloxacina en muestras de huevos $\mu\text{g.g}^{-1}$				
Marcas	Muestras	Concentraciones $\mu\text{g.g}^{-1}$	Promedio $\mu\text{g.g}^{-1}$	$\mu\text{g}/\text{Huevo}$
Marca 1	Mtra 1	0.8677	0.8432	40.47
	Mtra 2	0.8411		
	Mtra 3	0.8208		
Marca 2	Mtra 1	0.7813	0.8768	46.09
	Mtra 2	0.8391		
	Mtra 3	1.0099		
Marca 3	Mtra 1	0.8247	0.7498	40.34
	Mtra 2	0.7722		
	Mtra 3	0.6524		
Casero	Mtra 1	ND	ND	ND
	Mtra 2	ND		
	Mtra 3	ND		

zados en medicina veterinaria para el tratamiento de enfermedades en animales de producción. En nuestro país, el registro de los fármacos tiene autorizado el uso de fluoroquinolonas en pollos en crecimiento. Por otro lado, no contamos con un control sobre el uso extra etiqueta, por lo que no podemos asegurar el no uso de estos fármacos en estas aves y por lo tanto la ausencia de residuos de antimicrobianos en huevos destinados a consumo de la población.

Hemos podido demostrar con nuestra técnica analítica desarrollada la presencia de este compuesto a concentraciones de 40.34 $\mu\text{g}/\text{Huevo}$, 40.47 $\mu\text{g}/\text{Huevo}$ y 46.09 $\mu\text{g}/\text{Huevo}$ en las diferentes muestras de las marcas de huevos de gallinas estudiadas. Para ello en este trabajo de investigación se ha desarrollado y validado un método analítico para la determinación y cuantificación de la Ciprofloxacina (antibiótico de uso veterinario) en un tipo de muestra muy compleja como es la del huevo con límites de detección muy satisfactorios. Se ha puesto a punto un método analítico, que incluye una etapa de extracción en fase líquida, previa a su detección y cuantificación mediante cromatografía de líquidos de alta resolución HPLC. El método ha sido validado y utilizado con éxito para la determinación y cuantificación de la Ciprofloxacina en muestras de huevos obtenidas de supermercados del Gran Asunción. El método analítico ha demostrado ser altamente sensible en la detección de este antibiótico en las muestras de huevos, con límite de detección inferior a 0,18 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. El método analítico desarrollado ofrece una importante innovación científica, ya que en la actualidad son muy pocos los métodos publicados sobre estudios de estos compuestos en matrices biológicas, principalmente en huevos de gallina.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Alm El Dein, A.K. & Elhearon, E.R. (2010). Antibiotic residue in eggs of laying hens following injection with gentamicin. *New York Science Journal*, 3(11): 135–140.
- Balizes, G. & Hewitt, A. (2003). Determination of veterinary drug residues by liquid chromatography and tandem mass spectrometry. *Analytica Chimica*, 492(1-2): 105–131.
- Benítez-Villalba, J.C., Dorival-García, N., Villalba-Villalba, N. M. & Vílchez, J.L. (2018). Validación de un método de análisis de benzofenonas en muestras de suelo por extracción con líquidos presurizados y cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem. *Reportes Científicos de la FACEN*, 9(1): 51–63.
- Benítez-Villalba, J.C., Grau-Torales, M.G., Cristaldo-López, O.D., Bogado-Fernández, A.I., Arrúa-Martínez, L.A. & Villalba-Villalba, N.M. (2021). Validación de dos métodos analíticos para la determinación y cuantificación de la cafeína en yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) comercial, UV-visible y HPLC. *Reportes Científicos de la FACEN*, 12(1): 48–58.
- Benítez-Villalba, J.C., Zafra-Gómez, A., Dorival-García, N., Camino-Sánchez, F.J., Cantarero, S. & Vílchez, J.L. (2013). Ultra-performance liquid chromatography MS/MS method for the determination of parabens in compost from sewage sludge: Comparison of the efficiency of two extraction techniques. *Journal of Separation Science*, 36(16): 2635–2645.
- Botsoglou, N.A. & Fletouris, D.J. (2001). *Drugs residues in foods, pharmacology, food safety, and análisis*. (1st Ed). New York / Basel: Marcel Dekker Inc. xv + 1200 pp.
- Butaye P., Devriese L.A. & Haesebrouck F. (2003). Antimicrobial growth promoters used in animal feed: effects of less well known antibiotics on gram-positive bacteria. *Clinical Microbiology Reviews*, 16(2): 175–188.
- Cancho, G.B., García, F.M. & Simal, G.J. (2000). El uso de los antibióticos en la alimentación

- animal: perspectiva actual. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 3(1): 39–47.
- European Commission. (2002). Commission Decision 2002/657/EEC. *Official Journal of the European Communities*, L 221: 2–28.
- Cuadros Rodríguez, L., García Campana, A.M., Jimenez Linares, C., & Roman Ceba, M. (1993). Estimation of performance characteristics of an analytical method using the data set of the calibration experiment. *Analytical Letters*, 26(6): 1243–1258.
- Fajardo, A.L., Méndez, F.J. & Molina, L.H. (2011). Residuos de fármacos anabolizantes en carnes destinadas al consumo humano. *Universitas Scientiarum*, 16(1): 77–91.
- Farré, M. & Barceló, D. (2012). Analysis of emerging contaminants in food. *Trends in Analytical Chemistry*, 43: 240–253.
- García, J., Pico, Y. & Font, G. (2005). Determinación de residuos de quinolonas en alimentos de origen animal mediante electroforesis capilar espectrometría de masas. *Revista de toxicología*, 22(1): 77–88.
- Gharieb, M.M. & Atti, N.M.A. (2011). Ciprofloxacin drug residue in table egg. *Suez Canal Veterinary Medical Journal*, 16(2): 137–138.
- Gonzalez, A., Cuadros, L., Alonso, E. & Vilchez, J.L. (1996). Estimate of gas chromatographic blanks application to detection limits evaluation as recommended by IUPAC. *Journal of Chromatography A*, 726(1-2): 133–139.
- Gorla, N., Chiostri, E., Ugnia, I., Weyers, A., Giacomelli, N., Davicino, R. & Ovando, H. (1997). HPLC residues of enrofloxacin and ciprofloxacin in eggs of laying hens. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 8(4): 253–256.
- Griggs, D., Johnson, M., Frost, J., Humphrey, T., Jorgensen, F. & Piddock, I. (2005). Incidence and Mechanism of Ciprofloxacin Resistance in *Campylobacter* spp. Isolated from Commercial Poultry Flocks in the United Kingdom before, during, and after Fluoroquinolone Treatment. *Antimicrob Agents Chemotherapy*, 49(2): 699–707.
- IUPAC. (1978). Nomenclature, symbols, units and their usage in spectrochemical analysis – II data interpretation. Analytical chemistry division. *Spectrochimica Acta B*, 33(6): 241–245.
- Kowalski, P. (2008). Capillary electrophoretic method for the simultaneous determination of tetracycline residues in fish samples. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 47(3): 487–493.
- Macarov, C.A., Tong, L., Martínez, H.M., Hermo, M.P., Chirila, E., Wang, Y.X., Barrón, D. & Barbosa, J. (2012). Multi residue determination of the penicillins regulated by the European Union, in bovine, porcine and chicken muscle, by LC-MS/MS. *Food Chemistry*, 135(4): 2612–2621.
- Mandel, J. & Stiehler, R.D. (1954). Sensitivity—A criterion for the comparison of methods of test. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 53(3): 155–159.
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., L.M.C., De Jong, S., Lewi, P.J. & Smeyers Verbeke, J. (1997). *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics: Part A*. Amsterdam: Elsevier Science. vi + 867 pp.
- Montalvo, M., Olivos, O., Gilabert, S. & Rodríguez, A. (2004). Análisis del riesgo de los medicamentos veterinarios presentes en los alimentos. *Actualidad en Farmacología y Terapéutica*, 2(3): 168–175.
- Mottier, P., Parisod, V., Gremaud, E., Guy, P.A. & Stadler, R.H. (2003). Determination of the antibiotic chloramphenicol in meat and seafood products by liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 994(1-2): 75–84.
- Sorensen, L.k., Hansen, H. & Snor, L. (1999). Determination of Amoxicillin in Trout by Liquid Chromatography with UV Detection after Derivatization. *Journal of AOAC International*, 82(6): 1345–1352.
- Stoilova, N.A., Surleva, A.R. & Stoev, G. (2012).

- Simultaneous determination of nine quinolones in food by liquid chromatography with fluorescence detection. *Food analytical Methods*, 6(3): 803–813.
- Stolker, A.A. & Brinkman, U.A. (2005). Analytical strategies for residue analysis of veterinary drugs and growth-promoting agents in food-producing animals a review. *Journal of Chromatography A*, 1067(1-2): 15–53.
- Takeda, N. & Akiyama, Y. (1991). Pre-column derivatization of sulfa drugs with fluorescamine and high-performance liquid chromatographic determination at their residual levels in meat and meat products. *Journal of Chromatography A*, 558(1): 175–180.
- Verdon, E., Couedor, P., Roudaut, B. & Sanders, P. (2005). Multiresidue Method for simultaneous determination of ten quinolone antibacterial residues in multimatrix/ multispecies animal tissues by liquid chromatography with fluorescence detection: single laboratory validation study. *Journal of AOAC international*, 88(4): 1179–1192.
- Yorke, J.C. & Froc, P. (2000). Quantitation of nine quinolones in chicken tissues by High-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *Journal of Chromatography A*, 882(1-2): 63–77.
- Yoshida, H., Yamazaki, J., Ozawa, S., Mizukoshi, T. & Miyano, H. (2009). Advantage of LC-MS metabolomics methodology targeting hydrophilic compounds in the studies of fermented food samples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(4): 1119–1126.

IoT aplicado al monitoreo en tiempo real de cultivos agrícolas

IoT Applied to Real-Time Monitoring of Agricultural Crops

Federico Fernández^{1,*} 

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, Departamento de Investigación, San Lorenzo, Paraguay.

*Email: fefernandez@pol.una.py.

Resumen: Los notorios cambios en el comportamiento climático que van desde oscilaciones hacia valores extremos de temperatura hasta la ausencia de lluvias en largos periodos de tiempo, disminuyendo las fuentes naturales de agua como ríos y arroyos e incluso los depósitos subterráneos de agua, con los consiguientes daños que esto produce en todo lo concerniente a la producción agrícola trae como consecuencia, la disminución en la producción de los mismos con el consiguiente impacto en la economía por el aumento de los precios y en un caso más extremo la escases de los mismos, impactando en la calidad de vida de la población. Por ello es importante realizar un monitoreo en tiempo real de las condiciones en que se encuentran los cultivos agrícolas a fin de optimizar el uso de los recursos disponibles. A fin de llegar a estos objetivos el Internet de las Cosas (IoT) se ha demostrado como una herramienta muy útil debido, entre otras cosas, a la disminución del tamaño y precio de los circuitos integrados, aparición de circuitos empotrados o motas que permiten el diseño con una funcionalidad específica que incluyen sensores, reducción del consumo de potencia permitiendo la utilización de baterías, los cuales van apareciendo con mayor duración, la simplificación de las comunicación wifi que permite en la actualidad el acceso ilimitado a amplias zonas geográficas con dispositivos muy simples que no solo permite la comunicación Wifi sino también tienen integrada la posibilidad de medir variables mediante sensores. En este trabajo presentamos nuestro sistema mediante el cual se puede realizar el monitoreo de las condiciones de suelo en tiempo real utilizando tecnología IoT.

Palabras clave: *Motas, Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), ESP32, Tiempo Real.*

Abstract: The notable changes in climate behavior, ranging from temperature oscillations towards extreme values to the absence of rainfall over long periods of time, are diminishing natural water sources such as rivers, streams, and even underground water deposits. Consequently, these changes have resulted in damages to agricultural production, leading to a decrease in output and subsequent impact on the economy through increased prices. In more extreme cases, this can result in scarcity, ultimately affecting the population's quality of life. Therefore, it is important to monitor agricultural crops in real-time to optimize the use of available resources. To achieve these goals, the Internet of Things (IoT) has proven to be a valuable tool, thanks to advancements such as the reduction in size and price of integrated circuits, the emergence of embedded systems or motes with specific functionalities that include sensors, reduced power consumption enabling battery usage with longer durations, and simplified Wi-Fi communication that provides unlimited access to extensive geographic areas using simple devices. These devices not only enable Wi-Fi communication but also have integrated sensor capabilities. In this work, we present our system for real-time soil condition monitoring using IoT technology.

Keywords: *Motes, Wireless Sensor Networks (WSN), ESP32, Real-Time.*

Introducción

En la actualidad la optimización de los recursos utilizados en la agricultura es de vital importancia debido al aumento de las áreas cultivadas y la limitada disponibilidad de los recursos hídricos necesarios para sustentar los cultivos. Por ello es necesaria la búsqueda de mecanismos que nos permita supervisar de manera automática los procesos de riego y/o medir otras variables del suelo como

alcalinidad, oxigenación, humedad y todas aquellas variables que la tecnología nos permita medir de manera directa mediante la utilización de sensores.

En los últimos años se ha producido un aumento de la oferta de controladores, sensores, actuadores, medios de comunicación, motas, disminución de tamaño de los circuitos integrados, aumento de potencia y cálculo de controladores, la aparición de controladores con más un núcleo, diversos protoco-

Recibido: 03/08/2022 Aceptado: 14/04/2023



los de transmisión inalámbrica y fundamentalmente la aparición del Internet de las cosas, (IoT), que ha tenido como consecuencia la masificación de estas tecnologías y como consecuencia la reducción de sus costes de adquisición permitiendo la masificación en su uso y aplicaciones en diferentes ámbitos de la tecnología como la industria salud, automoción, aviación, seguridad, etc.

En este trabajo se ha utilizado la tecnología relacionada al IOT para monitorizar un sistema agrícola midiendo parámetros muy simples como la humedad del suelo, la temperatura y humedad en el entorno y transmitiendo directamente vía Wifi las señales sensoriales adquiridas.

Estas señales son gestionadas por una aplicación IoT en la nube directamente siendo posible su visualización en tiempo real mediante su acceso por cualquier usuario que disponga de las credenciales que se lo permitan. Se han encontrado varias publicaciones en la literatura acerca de proyectos parecidos pero nuestro aporte es la de integrar directamente en una aplicación en la nube todas las señales que se van adquiriendo y transmitiendo a la vez dándole simplicidad a nuestro proyecto pero sin perder eficiencia en su funcionamiento.

La diferencia de este proyecto con otros es que se puede implementar en grandes extensiones de tierra gracias al controlador que se utilizara en este trabajo que es el ESP32 cuya característica principal es que además de tener un controlador de dos núcleos que permite distribuir la carga de un proceso complejo en dos CPUs, dispone terminales para conectar como entrada tanto sensores analógico como digitales.

Tiene integrado dentro del mismo circuito un dispositivo de transmisión capaz de operar en modo Bluetooth y también en modo Wifi lo que le da un amplio alcance para el proceso de supervisión de las variables de interés por lo que siempre, por más grande que sea la extensión a monitorear, una red de sensores con una arquitectura adecuada como mesh o algo similar permitirá realizar satisfactoriamente.

Este trabajo consiste de cinco módulos, en la sección II se presentan los trabajos relacionados que dieron paso a esta propuesta, en la sección III

se describe la metodología utilizada para ejecutar este proyecto, en el IV se describen los resultados y en la sección V las conclusiones.

Trabajos relacionados

El estudio de las condiciones de temperatura y humedad ambiente como así también la humedad del suelo en un campo de producción agrícola, ha sido una constante desde la aparición de la agricultura en la evolución del hombre. A medida que ha transcurrido el tiempo esto se ha vuelto más importante debido a la mayor demanda de la producción y por tanto del aumento de la superficie a ser cultivada.

Al ser los recursos necesarios cada vez más limitados se hace necesaria que la utilización de los mismos deba ser optimizada. La automatización de estos procesos es una vertiente del desarrollo de ha sufrido la industria de la automatización. Esa evolución tiene uno de sus exponentes el microcontrolador ESP 32 que es un dispositivo de bajo consumo, su tensión de funcionamiento es 3,3 Volt, bajo costo y que tiene la particularidad de tener integrados dentro del mismo dos núcleos que le da de gran capacidad de cálculo, interfaces de entrada salida para dispositivos analógicos y digitales y la posibilidad de transmitir ya sea por wifi o Bluetooth lo que le permite un alcance amplio y la integración del mismo como parte de un red de sensores inalámbricos que le permitirá abarcar la supervisión de una área extensa de cultivo (ESP32, 2022; Hübschmann, 2020; Cheddadi *et al.*, 2020).

En Rojas López *et al.* (2019) se propone la implementación de un sistema de riego basado en Arduino y Raspberry PI 3 utilizando como protocolos de comunicación Bluetooth. En Haro Vilaña (2019) se propone un sistema de monitoreo y riego utilizando el controlador ESP32 con protocolo de comunicación LoRa. En Plasencia Lema (2019) se considera el monitoreo de variables en un entorno urbano con ESP32, en Perafán-Martín (2018) se desarrolló un sistema de monitoreo *de reservorios*. *En todos los casos no se ha evidenciado la utilización de mecanismos que se distingue por el envío de los datos directamente a una herramienta IoT*

alojada en la nube y desde el cual se podrá acceder mediante un punto de acceso Wifi.

Trabajo propuesto

El sistema está implementado con varias motas que tienen la particularidad de tener empotrado un controlador ESP32, un sensor de humedad de suelo capacitivo y un sensor de humedad y temperatura ambiente DHT11. La ventaja de tener un sistema empotrado de estas características es a que parte de la electrónica integrada de los sensores también se encuentra la fuente de alimentación lo que contribuye a la estabilidad del funcionamiento del circuito y por tanto la rápida construcción de la red inalámbrica.

Cada terminal es una mota, Fig. 1, que es un módulo sensor capacitivo de humedad del suelo y temperatura y humedad del aire basado en el microcontrolador ESP32 Rev1. Además, puede funcionar desde una fuente de alimentación externa con un cable USB para las pruebas de diseño y para el funcionamiento en campo lleva empotrado la posibilidad de utilizar una batería del tipo 18650, que le permite autonomía de funcionamiento para realizar tareas de campo, además le hemos adaptado una carcasa de plástico para protegerlo de los ataques propios del clima y permitir su funcionamiento independientemente de las condiciones del tiempo.

El microcontrolador ESP32, en sus diferentes versiones, tiene la propiedad de tener incluidos numerosos módulos que permiten un abanico de

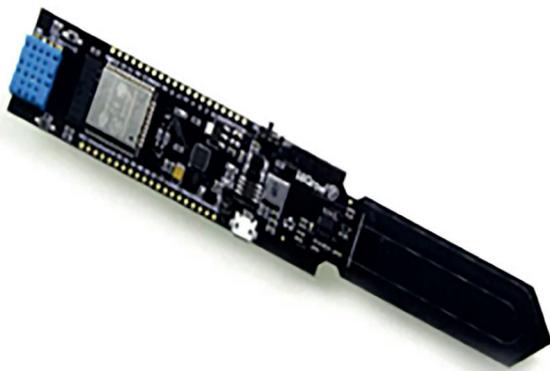


Figura 1. Mota utilizada.

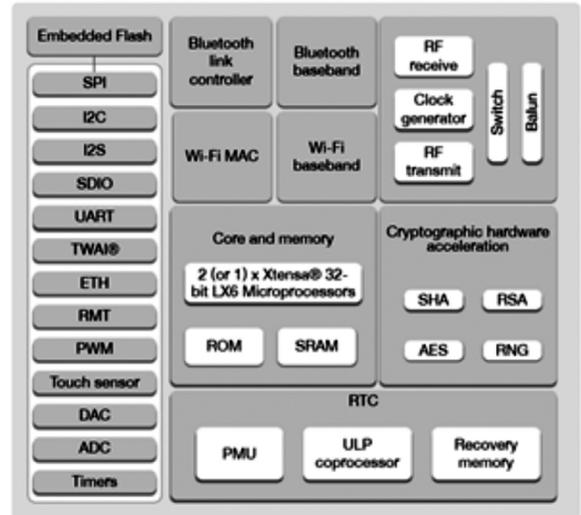


Figura 2. Módulos que componen el microcontrolador ESP32 (Espressif Systems, 2023).

posibilidades para la ejecución de nuestro proyecto, Fig. 2.

Como podemos ver en el diagrama de módulos del ESP32, el mismo consta de numerosas funcionalidades como ser dos CPUs dentro del mismo controlador, lo que nos da la posibilidad de ejecutar dos programas de manera independiente o complementaria compartiendo datos, la posibilidad de poder transmitir utilizando protocolo Bluetooth o Wifi siendo la utilización de este último protocolo el que permite un alcance ilimitado en envío y recepción de datos.

A diferencia de otros controladores ya tiene integrados los módulos de transmisión con diferentes protocolos. Otro aspecto importante a diferencia de modelos anteriores de motas que venían con sistemas operativos específicos, es la disponibilidad de entornos de desarrollo abiertos para la programación como el Arduino IDE o Platformio IDE que nos permite su programación no solo en forma monoproceso sino que posibilita utilizar ambas CPU mediante la ejecución concurrente de procesos mediante programación en lenguaje C/C++ o Python habilitando la utilización de la amplia disponibilidad de librerías open source para el funcionamiento del ESP32. Hay que mencionar que utilizando el sistema operativo FreeRTOS nos

habilita utilizar ambos núcleos del ESP32 a fin de realizar procesamiento paralelo.

Como herramienta de programación utilizamos el Visual Studio Code, debido a su portabilidad y flexibilidad ya que al instalar la extensión PlatformIO se puede programar la placa ESP32 como si fuese un entorno Arduino. Además es posible, con la instalación de las extensiones respectivas escribir archivos Python, HTML, CSS y JavaScript para crear páginas web para los servidores web, brindando mayores posibilidades a nuestro sistema.

Ahora bien, para la transmisión de información y la posibilidad de acceso desde diferentes ubicaciones geográficas existen diferentes herramientas que brindan esta posibilidad para los sistemas IoT: MQTT, Firebase, Node-red, IBM Watson, Azure IoT Edge, etc.

Para nuestro proyecto hemos elegido IBM Watson IoT Platform, que es un servicio suministrado por IBM alojado en la nube que está diseñado para simplificar el proceso de presentación de la evolución de datos provenientes de sensores de sistemas basados en el internet de las cosas.

De manera general las funcionalidades que ofrece van desde el registro de dispositivos como sensores y dispositivos móviles, control de conectividad de los mismos permitiendo la supervisión remota del funcionamiento de los mismos, visualización de datos sensoriales en tiempo real, agrupación de variables según una lógica de funcionamiento, y almacenamiento de datos.

Además de ello hay que mencionar que el IoT Platform es solo una aplicación más de las varias que IBM Watson pone a disposición de los usuarios ya que existen otras aplicaciones como Machine Learning, IA, etc., que permiten procesar los datos provenientes de los sensores hacia niveles más altos de información y toma de decisiones.

Estas herramientas al estar disponibles en la nube ahorran muchísimo tiempo de desarrollo del proyecto y facilita su diseño y depuración desde el punto de vista técnico y por consiguiente incluso desde el punto de vista económico ya que en algunos casos la utilización de los mismos es libre hasta un determinado número de sensores.

Resultados y discusión

La red de sensores inalámbricos consta de motas basadas en el microcontrolador ESP32 que están ubicados sobre la superficie de terreno cuya temperatura y humedad ambiente además de la humedad de suelo se desea monitorear. Las motas ya vienen empotradas con el procesador ESP32, el sensor de temperatura y humedad ambiente DHT11, el sensor de humedad de suelo capacitivo, el soporte para la batería del tipo 18650 y toda la electrónica necesaria para el funcionamiento estable del conjunto.

El código utilizado es una adaptación de Varper Technologies (2022) y Salsabila (2020), que lee un sensor DHT11 con un controlador ESP32 y lo transmite a IBM IoT. Como la mota utilizada tiene empotrado un sensor DHT11 se ha modificado y adaptado el código a las características de la mota y habilitado un puerto para la lectura del sensor de humedad para, juntamente con otros sensores integrarlo en una red de monitoreo agrícola aprovechando las ventajas que ofrece la plataforma de IBM Watson para realizar no solo las lecturas instantáneas de las motas sino seguir su comportamiento de manera visual.

El funcionamiento de la mota es la de captura de datos y su posterior transmisión utilizando protocolo WiFi hasta el punto de acceso WEB. Desde ese punto los datos acceden a la plataforma IoT de IBM Watson y allí los datos son procesados para su presentación visual. Este aspecto es una de las más ventajosas de utilizar este protocolo ya que todo el código de lectura y visualización de datos son utilizados por el usuario ya que son suministrados por la aplicación.

Estos datos tienen varios valores añadidos como pueden ser la restricción de acceso a los componentes de la red como administradores, usuarios técnicos etc., así como la posibilidad de ser accedidos desde un PC o un dispositivo móvil ya sea con un entorno Android o Windows. Como son procesos lentos las actualizaciones de los datos leídos y transmitidos por cada mota se puede hacer cada minuto o el tiempo que el usuario considere conveniente, lo que permite ahorrar batería y volumen de tráfico de datos.

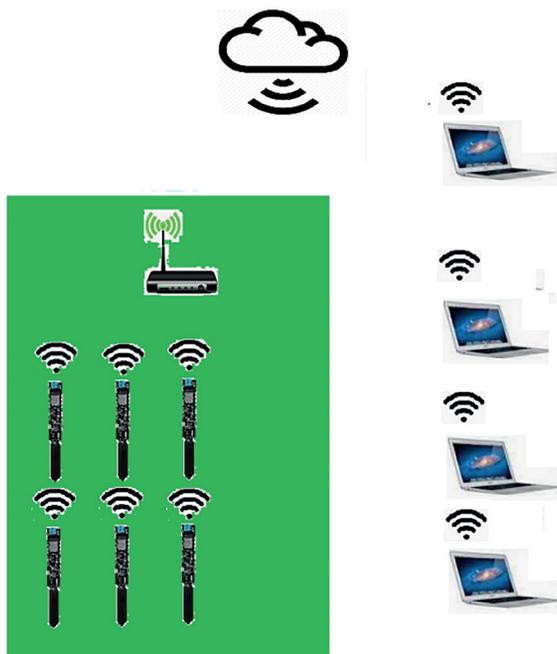


Figura 3. IoT aplicado al monitoreo de un campo agrícola.

En caso de que la distribución de las motas tenga que abarcar una extensión de terreno amplio y se necesite realizar ruteo entre motas se puede aprovechar la capacidad del ESP32 de tener dos núcleos y por tanto ejecutando dos procesos de manera paralela, uno para lectura y transmisión de datos y el otro proceso como repetidor en caso de ser necesario.

A efectos de ahorro de energía de las baterías y según criterio de funcionamiento se puede realizar la lectura y transmisión de datos de manera continua o durante intervalos de tiempo en la que el ESP32 alterna entre estados de transmisión y modo sleep a fin de activarse solo cuando existe una trama que lo necesita.

En la Fig. 3 se observa el esquema de funcionamiento de la red de sensores.

Ahora bien como el objetivo de este trabajo es cubrir las necesidades de monitoreo de una gran extensión entonces se tendrán que utilizar tantas terminales como sean necesarias para cubrir toda la extensión a ser monitorizado. Como debido al alcance del proyecto el área a cubrir puede ser mayor que el alcance individual de las motas será

necesario introducir repetidores fin de lograr la cobertura total de la superficie.

Hay que mencionar que existen modelos basados en el ESP32 que tienen capacidades superiores al modelo que hemos utilizado en nuestro proyecto, que tienen mayor alcance de transmisión y por tanto se puede tener una cobertura de la misma extensión pero con menor número de motas y de ser posible sin repetidores.

Por supuesto mayor potencia de transmisión implica mayor consumo de energía y la necesidad de utilizar otra fuente de alimentación con lo que el costo del proyecto aumentará. Al estar expuesto al aire libre las fuentes de alimentación y almacenamiento basados en energía fotovoltaica se presentan como la mejor opción ya que brinda autonomía al funcionamiento de la red.

En la Fig. 4 vemos la mota que realiza las medidas de campo. La misma consta de la mota propiamente, la batería del tipo 18650 con su correspondiente carcasa de protección contra los embates agresivos de la naturaleza. La misma fue realizada utilizando impresoras 3D. Se observa



Figura 4. Mota utilizada en la medida de campo.

el funcionamiento individual de cada sensor. El mismo realiza las mediciones de la temperatura y la humedad ambiente y de la humedad del suelo, ya sea de manera continua o intermitente a fin de prolongar la duración de la batería.

Por otra parte, cada mota el transmitir sus datos lo hace con una identificación como ID del dispositivo que puede ser un nombre cualquiera asociado a su código de ejecución o puede ser el código de identificación del fabricante del controlador que es único para cada dispositivo, con lo cual las transmisiones tienen un cierto nivel de seguridad facilitando la gestión e identificación de cada mota. Para aumentar los niveles de seguridad se pueden agregar datos adicionales como el nombre de la empresa y un código de autenticación que puede ser brindada por el usuario o que lo puede dar la propia plataforma IBM Watson.

Por tanto cada mota va emitiendo con una identificación propia y códigos de seguridad que son validados por la plataforma IBM Watson antes de ser procesada para su visualización. Una vez

que los datos acceden a la plataforma ya estamos en condiciones para convertirla en información relevante para que la misma pueda ser interpretada. Puede ser presentada como lectura de panel digital o como evolución de medida en el tiempo además de ser almacenadas.

Nuestra red está compuesta por tres motas pudiendo ser ampliada hasta 200 para su observación entiendo real ya que este es el número máximo de lecturas que puede hacer la versión gratuita de IOT IBM Watson.

Como se ha mencionado antes una vez que los datos han accedido al sistema se pueden usar todas las herramientas que ofrece IBM Watson para darle mayor valor a las lecturas realizadas, permitiendo obtener de esta forma con un mínimo de desarrollo de software, gracias a las aplicaciones disponibles, tener un sistema muy potente en cuanto a cálculos almacenamiento presentación grafica inteligencia artificial etc.

En la Fig. 5 vemos una captura de nuestra red en funcionamiento formadas por tres motas que van

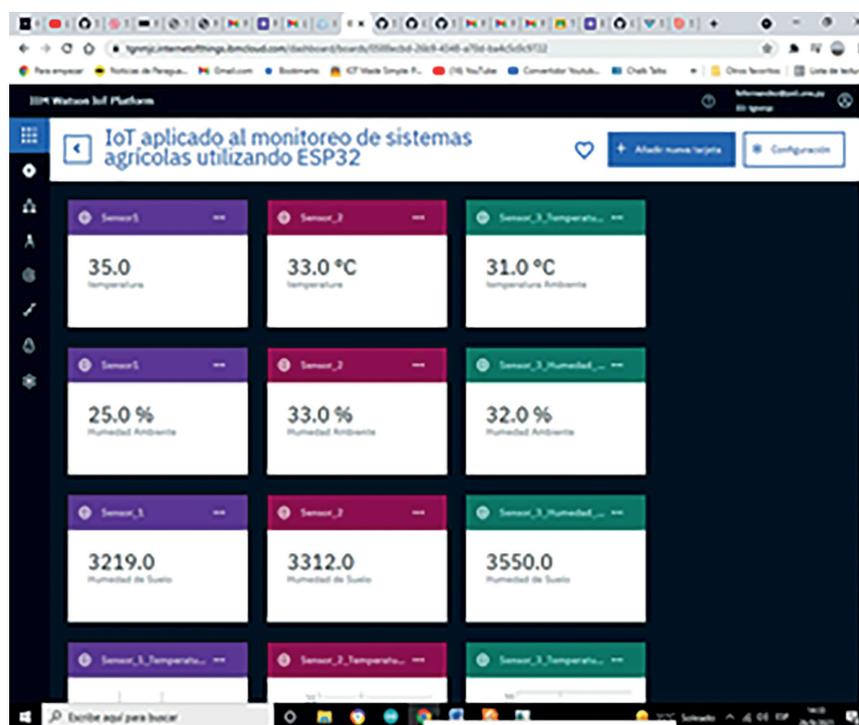


Figura 5. Indicaciones de paneles mostrando los valores instantáneos suministrados por los sensores.

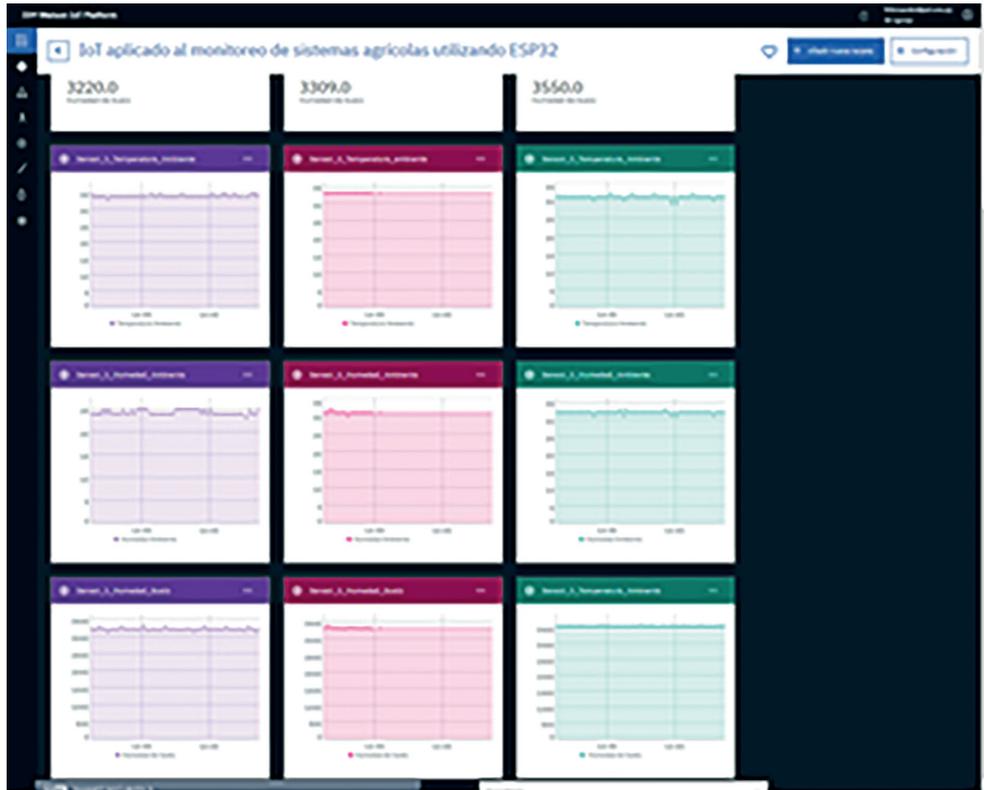


Figura 6. Indicaciones de paneles mostrando los valores históricos suministrados por los sensores.

transmitiendo de manera continua y que responden en tiempo real a cualquier variación que detecten nuestros sensores. Los mismos pueden ser accedidos a través de la web, siempre que los interesados tengan lo permisos correspondientes. Se ve claramente la concordancia en los datos sensoriales que se van adquiriendo.

En la Fig. 6 se observa la evolución histórica de los valores obtenidos de los sensores dándole un mayor valor a la información recabada.

Los resultados obtenidos por nuestra red son óptimos. A pesar de trabajar con el dispositivo más pequeño de la familia del ESP32 los resultados se pueden extrapolar a cualquier otro sistema sensorial, independientemente de las variables medidas, que utilicen como controlador el ESP32. La posibilidad de acceso directo a la red Wifi que se logra gracias al transmisor empotrado dentro del ESP32 que a su vez lo está dentro de la mota y en comunicación directa con el IBM Watson, lo hace una herramienta muy sencilla pero a su vez muy

poderosa para establecer redes de sensores basado en el Internet de las Cosas. El mecanismo utilizado para la ejecución de este proyecto también es aplicable a cualquier otro proceso cuyas variables necesiten ser evaluadas constantemente.

Conclusiones

Nuestra red inalámbrica se encuentra en el estado inicial de funcionamiento. El modelo puede ser modificado para ampliar una mayor superficie geográfica ya sea utilizando dispositivos basados en el ESP32 que tengan mayor alcance de transmisión, o utilizar algoritmos de ruteo para que las señales a ser transmitidas lleguen a un punto de acceso Wifi en caso de que algunos terminales no puedan conectarse directamente a los AP.

También puede ser utilizado para realizar un sistema de control de riego, ya que con pequeñas modificaciones en el software de control y añadiéndole los actuadores necesarios puede implementarse dicho sistema.

Así mismo, el modelo es válido para una aplicación en sistemas automáticos de control industrial ya que la capacidad de los protocolos de transmisión wifi y BlueTooth que posee el ESP32 nos brinda la posibilidad de realizar redes aplicando ambos protocolos.

Otro aspecto importante de nuestro proyecto es la posibilidad que brindan el acceso a las aplicaciones que ofrece el IBM Watson ya que mediante los mismos se pueden utilizar los datos que se van adquiriendo para almacenarlos para su posterior análisis off-line, utilizar técnicas de inteligencia artificial, machine learning para los datos sensoriales que se van adquiriendo permitiendo diseñar aplicaciones con modernos avances utilizando código ya preestablecido.

Otros estudios posteriores podrían ser el estudio de mecanismos a ser utilizados para maximizar la duración de las baterías que utiliza nuestra mota.

Conflictos de interés

El autor declara no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Cheddadi, Y., Cheddadi, H., Cheddadi, F., Errahimi, F., & Es-sbai, N. (2020). Design and implementation of an intelligent low-cost IoT solution for energy monitoring of photovoltaic stations. *SN Applied Sciences*, 2(1165): 1–7.
- ESP32. (2022). *The Internet of things with ESP32*. [Consulted: 20.vii.2022]. <<http://esp32.net/>>.
- Espressif Systems. (2023). *ESP32 Series Datasheet*. V4.2. Shanghai: Espressif Systems. 70 pp. [Consulted: 13.ii.2023]. <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>.
- Haro Vilaña, I.V. (2019). *Implementación de un sistema de monitoreo y control automático de riego para invernaderos mediante tecnología LoRa con ESP32*. Trabajo de Grado. Quito: Universidad Tecnológica Israel. 148 pp. [Consulted: 20.vii.2022]. <<http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/2142>>.
- Hübschmann, I. (2020). *ESP32 for IoT: A Complete Guide*. Denmark: Nabto. [Consulted: 20.vii.2022]. <<https://www.nabto.com/guide-to-iot-esp-32/>>.
- Perafán-Martín, C.A. (2018). *Agrodroyd: sistema de monitoreo para cuidado y riego de productos agrícolas en cultivos urbanos*. Trabajo de Grado. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. 126 pp. [Consulted: 20.vii.2022]. <<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/181d91ae-0df7-4d5f-885a-2c99b6d357bd>>.
- Plasencia Lema, D.J. (2019). *Red de controladores para la dosificación automática de agua del reservorio Tunga en el caserío El Rosal de Mocha*. Trabajo de Grado. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. xviii + 97 pp. [Consulted: 20.vii.2022]. <<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30113>>.
- Rojas Lopez, D., Bermúdez Luna, Y. & Castañeda Tibaquirá, D. (2019). *Sistema de riego para control y supervisión de cultivo de espina-ca*. Trabajo de Grado. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 25 pp. [Consulted: 20.vii.2022]. <<https://repositorio.udistrital.edu.co/handle/11349/16048>>.
- Salsabila, F.A. (2020). *System Embeded: ibm.ino*. GitHub. [Consulted: 20.vii.2022]. <<https://github.com/faraaurin/Sistem-Embedded/blob/main/ibm.ino>>.
- Varper Technologies. (2022). *Sensor de humedad del suelo wifi higrrow esp32*. Santiago: Varper Technologies. [Consulted: 20.vii.2022]. <<https://www.varpertechnologies.com/sensor-de-humedad-del-suelo-wifi-higrrow-esp32>>.

Estudio de la capacidad depuradora de *Pistia stratiotes* L. en el tratamiento de aguas residuales generados en el Laboratorio de Efluentes de FACEN-UNA

Study of the purification capacity of *Pistia stratiotes* L. in the treatment of wastewater generated in the Effluents Laboratory of FACEN-UNA

Elsa Cárdenas^{1,*}, Zunilda Allende¹, María Ferreira¹, Alan Velázquez¹ & Christian Vogt²

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Laboratorio de Efluentes.

² Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Laboratorio de Recursos Vegetales.

*Autor correspondiente: elsacardenas74@gmail.com.

Resumen: Los sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de plantas acuáticas flotantes representan una opción interesante, cuyo desarrollo, diseño y operación se ha basado en procedimientos empíricos debido principalmente a que no se han generado los datos suficientes que permitan crear modelos generales de diseño y mantenimiento. Las macrófitas flotantes han demostrado ser eficientes en la biorremediación de aguas residuales con contenidos de materia orgánica y sustancias tóxicas perjudiciales para el medio ambiente. La necesidad de encontrar alguna solución a esta situación creciente de contaminación y la posibilidad de reutilizar las aguas residuales ha motivado a realizar este estudio, cuyo objetivo fue estudiar la capacidad depuradora de la *Pistia stratiotes* L. en el tratamiento de aguas residuales a fin de establecer el uso potencial de esta especie. Los parámetros fisicoquímicos fueron analizados siguiendo las técnicas analíticas estandarizadas publicadas por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WPC. Con respecto a resultados obtenidos de los parámetros ensayados se observó una remoción por debajo del 50%, la DBO5 (30,7 %), la DQO (40,8%), los Sólidos Suspendidos Totales - SST (42%), el pH varió entre 5,4 y 6,2, el Oxígeno disuelto fue en aumento tomando valores de 4,78 mgO₂/L a 12,09 mgO₂/L. Teniendo en cuenta los resultados estadísticos de los valores del tes *t*, se concluyó que no hubo remoción significativa de los parámetros fisicoquímicos y microbiológico analizados en las distintas concentraciones utilizadas (5, 25, 50, 75 y 100) %, esto pudo estar influenciada por las bajas temperaturas de la estación y el corto plazo de exposición de la planta con el agua residual.

Palabras clave: *Pistia stratiotes*, aguas residuales, depuradora, remoción.

Abstract: Wastewater treatment systems based on floating aquatic plants represent an interesting option, whose development, design, and operation have been based on empirical procedures, mainly because sufficient data has not been generated to create general design and maintenance models. Floating macrophytes have proven to be efficient in bioremediation of wastewater containing organic matter and toxic substances that are harmful to the environment. The need to find a solution to this growing situation of contamination and the possibility of reusing wastewater has motivated this study, whose objective was to study the purifying capacity of *Pistia stratiotes* L. in wastewater treatment in order to establish the potential use of this species. The physicochemical parameters were analyzed following the standardized analytical techniques published by the Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WPC. Regarding the results obtained from the tested parameters, a removal below 50% was observed: BOD5 (30.7%), COD (40.8%), Total Suspended Solids - TSS (42%), pH it varied between 5.4 and 6.2, the dissolved Oxygen was increasing, taking values from 4.78 mgO₂/L to 12.09 mgO₂/L. Taking into account the statistical results of the *t* test values, it was concluded that there was no significant removal of the physicochemical and microbiological parameters analyzed in the different concentrations used (5, 25, 50, 75 and 100) %, this could be influenced by the low temperatures of the season and the short term of exposure of the plant with the residual water.

Keywords: *Pistia stratiotes*, wastewater, treatment plant, removal.

Introducción

A medida que la población continuó su desarrollo, las descargas de aguas residuales domésticas e industriales empezaron a contaminar los recursos

hídricos, a deteriorar los ecosistemas, entre otros. Fue así como se hizo necesario implementar sistemas de tratamientos de aguas residuales. La limitada conciencia acerca de la importancia de cuidar el

Recibido: 01/11/2022 Aceptado: 14/04/2023



medio ambiente, sigue siendo una problemática, no por falta de leyes, normativas, resoluciones, sino por una incorrecta aplicación de las exigencias y cumplimiento de los mismos por parte de los responsables de velar por su cumplimiento. El escaso control aplicado, permite que sigan proliferando este tipo de contaminación. Algunas de las industrias a pesar de contar con plantas de tratamiento de aguas residuales son insuficientes o inadecuadas y en algunos casos es casi nulo. Según Oliveira & Costa (2002), la descarga de efluentes en cursos de agua es una de las fuentes más importantes de contaminación tóxica en el medio ambiente. La disposición de residuos industriales y también otros medios de contaminación, debería tener un destino adecuado, para que no afecte a los medios acuáticos y se pierda la calidad de sus aguas.

Por ésta razón en todo el mundo cada vez se pone mayor atención al tratamiento de éste tipo de agua residual, aplicando métodos que combinan procesos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, los sistemas de tratamiento biológicos de aguas residuales con plantas acuáticas no han sido muy estudiadas (Bolaños Benítez *et al.*, 2008). Pero existen algunos estudios de remoción de metales con la *Pistia stratiotes* L., podemos citar algunos de ellos como: “Un estudio sobre el potencial de fitorremediación de cadmio de la lechuga de agua, *Pistia stratiotes* L” por Suchismita Das *et al.*, (2013), donde se encontró que el máximo del factor de translocación (TF) fue de 0,6 y se observó una eficiencia de translocación de raíz a brote de hasta un 60% para 15 mg/L de Cd, lo que apunta hacia la idoneidad de la lechuga de agua para eliminar el Cd de las aguas superficiales.

Odjegba & Fasidi (2003), realizaron un estudio titulado “Acumulación de oligoelementos por *Pistia stratiotes*: implicaciones para la fitorremediación”, donde se examinó la toxicidad de ocho oligoelementos potencialmente tóxicos (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) para *Pistia stratiotes* para determinar si esta planta mostraba suficiente tolerancia y acumulación de metales para ser utilizada para fitorremediación de aguas residuales y/o cuerpos de agua naturales contaminados con estos metales

pesados. También existen estudios como “Fitorremediación para eliminar nutrientes y mejorar las aguas pluviales eutróficas utilizando lechuga de agua (*Pistia stratiotes* L.) por Qin Lu *et al.*, (2008), donde concluyeron que la lechuga de agua tiene un gran potencial para eliminar N y P, reducir los sólidos suspendidos en el agua y la turbidez de las aguas pluviales y mejorar la calidad del agua.

El uso de plantas para la remoción de contaminantes de aguas, conocida como fitorremediación, tiene la ventaja de requerir menor cantidad de recursos económicos y tecnológicos que los tratamientos convencionales; por lo cual podrían ser utilizadas inclusive en países en vías de desarrollo (Paris *et al.*, 2005). La fitorremediación es una tecnología que puede ser utilizada para tratar ambientes acuáticos contaminados por metales pesados. En esta técnica, las plantas, principalmente macrófitas acuáticas, se utilizan para eliminar y/o contener contaminantes dispersos en el agua o sedimentos contaminados (Pio *et al.*, 2013).

En Brasil se realizó un estudio sobre fitorremediación por Pinto *et al.*, (2015), denominado “Determinação da Potencialidade de Utilização da *Pistia stratiotes* como Agente Fitorremediador de Ambientes Naturais” donde se pudo comprobar que esta macrófita acuática puede ser utilizada en procesos de fitorremediación en ambientes naturales. En Perú se realizó el siguiente estudio: “Eficiencia de Fitorremediación de *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* en lixiviados generados en el botadero de Cuñumbuqui, San Martín 2020.”. Existen antecedentes de la evaluación con las plantas acuáticas *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales municipales (ARM) de la ciudad de Riohacha en Colombia, en el cual se estableció un diseño experimental de un factor (plantas) y seis niveles que corresponden a los cinco tratamientos y un control. También existe otra investigación donde se evaluó el potencial de fitorremediación, fisiológico respuestas y cinética de absorción de zinc (Zn) de la lechuga de agua (*Pistia stratiotes* L.) de la ciudad de Brasil. Se evaluó el efecto del cromo hexavalente [Cr(VI)] en el desarrollo de *Pistia stratiotes* y *Eichhornia*

crassipes, mediante el monitoreo de microcosmos, en Venezuela. Actualmente en Paraguay no se encuentran hallazgos sobre trabajos de investigación y publicaciones como posible depurador en aguas residuales de contaminantes orgánicos, sin embargo, es utilizado como planta medicinal antiinflamatoria.

La *Pistia stratiotes* es una planta acuática flotante, casi acaulescente, monoica, tallos a veces produciendo estolones con nuevas rosetas de hojas en el ápice; hojas arrosetadas, pecíolo corto, lámina más o menos obovada, redondeada o emarginada en el ápice, cuneada en la base (Croat & Carlsen, 2003; Dray & Center, 2002). *P. stratiotes* se dispersa naturalmente por propagación vegetativa, es decir que las plantas hijas se desprenden de las plantas madre y son transportadas por las corrientes de agua o por los animales a nuevos sitios (Neuenschwander *et al.*, 2009). En China, esta planta se cultiva para la alimentación animal y se utiliza para tratar la hinchazón y las infecciones del tracto urinario. La pasta de hojas, que se sirve al ganado, provoca la lactancia y acrecienta la cantidad de leche. También tiene uso como planta ornamental de acuario. Se utiliza como combustible, como fuente para la producción de gas metano. Tiene potencial para ser utilizado como forraje para animales. (Beentje, H.J. *et al.*, 2017).

En Paraguay la *Pistia stratiotes* se conoce como llantén de agua. Lallana, (1997) menciona que, las plantas acuáticas (también llamadas macrófitas o hidrófitos), tienen gran importancia biológico desde varios puntos de vista; por su peculiar fisiología, su extraña y elegante anatomía, sus adaptaciones a condiciones adversas (nivel fluctuante de las aguas, principalmente) o su respuesta al ambiente. Su papel en el ecosistema es destacable, ya que no sólo sirven de sustrato o hábitat para comunidades de crustáceos, insectos y gusanos de vida acuática, sino que también sirven para la alimentación y refugio de peces, aves y animales como el "carpincho" y la "nutria de río" que utilizan los "camalotales" de *Eichhornia crassipes* para construcción de "dormideras" (refugios). Las plantas acuáticas constituyen el principal acceso de entrada de la energía radiante al ecosistema permitiendo la subsistencia de distin-

tas formas biológicas que dependen de la materia orgánica formada en sus tejidos por fotosíntesis.

La principal ventaja de estos sistemas de tratamiento con plantas acuáticas es la gran superficie de contacto que tienen sus raíces con el agua residual. La principal desventaja de los sistemas con macrófitas flotantes es la limitada capacidad de acumular biomasa, por lo que se deben retirar periódicamente la misma para permitir de esa manera el crecimiento de las plantas, y esto encarece el proceso en lo que a mano de obra se refiere (Martelo & Borrero, 2012).

Materiales y métodos

Selección de la muestra: Durante las primeras semanas del mes de junio de 2021 fueron colectados 55 ejemplares de *Pistia stratiotes* en el Km 68 de la Ruta PY 03, Barrio Gral. Elizardo Aquino de la Ciudad de Arroyos y Esteros. La colecta se realizó con redes de mano, colocadas en recipientes de plástico para el transporte hasta el laboratorio de Efluentes para su posterior aclimatación. Como las plantas vienen de un ambiente en condiciones diferentes al laboratorio, se necesitó un periodo de adaptación a las nuevas condiciones ambientales. Fueron seleccionadas las plantas maduras, con similitud en tamaño y masa.

Agua a tratar: El agua residual se obtuvo de los desechos generados de las diferentes muestras que ingresaron al laboratorio para sus ensayos, y fueron unificados en un recipiente de plástico (tambor) hasta el momento de su utilización.

Instrumentos y materiales: Para la medición de la temperatura de aclimatación de los plantines fue utilizado un termómetro de mercurio. El pH fue medido con un pH-metro de la marca BOECO, el oxígeno disuelto con un oxímetro de la marca HANNA HI98193, la DQO se digirió en un equipo de reflujo abierto, la DBO5 se mantuvo por 5 días en una incubadora a 20°C de la marca QUIMIS, la turbidez con un turbidímetro de la marca HACH.

Procedimientos: Los estudios se realizaron en el Laboratorio de Efluentes de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, ubicado en el Campus de la UNA en la ciudad de San Lorenzo, Departamento

Tabla 1. Promedio de resultados desde la primera semana hasta la quinta semana para cada dilución.

Parámetros	OD		DQO		DBO5		Colif. Fecal		SST		S Sedim.		pH		Turbidez		Color	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final
5%	8,33	11,72	13,9	9,8	6,1	6,0	800	0	4,0	3,2	0,1	0,1	5,9	6,2	1,4	1,1	11	15
25%	7,94	12,09	55,5	28,9	23,8	14,1	820	120	18,5	9,0	0,6	0,3	6,1	5,9	4,1	3,8	24	26
50%	7,17	12,04	87,0	53,6	34,9	25,7	1480	720	37,8	16,7	1,9	0,6	5,7	5,4	19,7	6,3	33	72
75%	6,49	9,75	139,4	75,6	68,2	36,9	1480	6600	43,1	27,0	0,9	1,2	5,6	5,5	16,7	17,1	45	67
100%	4,78	9,09	214,8	121,7	79,8	48,9	5900	1440	75,5	41,1	2,5	1,9	6,0	5,4	35,6	15,9	70	76

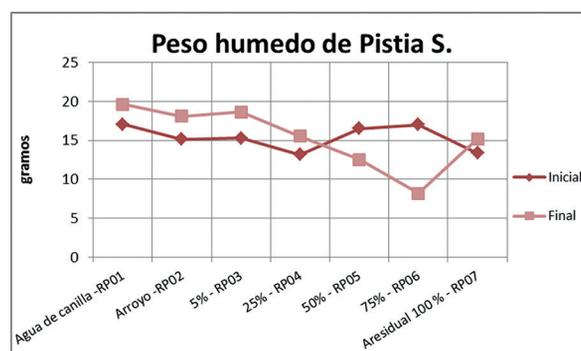
Central. Se realizó la aclimatación de los plantines recolectados en una mezcla que contenía al agua del medio natural en el que vino las plantas, más agua de canilla y del estanque de FACEN. Una vez cumplido los días de aclimatación, se procedió a pesar los plantines (peso húmedo) para luego ser introducidos en cada una de las diluciones preparadas para realizar el experimento. Se utilizaron 7 plantines en cada recipiente, pero no se tuvieron en cuenta los nuevos brotes.

Las plantas fueron sembradas en recipientes de plásticos con capacidad útil de 10 litros a diferentes concentraciones (5; 25; 50, 75 y 100) %, respectivamente con aguas residuales. La medición de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en las aguas residuales se realizó antes y después del sembrado de las plantas, para cada recipiente pasado los 7 siete días desde la siembra, luego se renovó el agua residual de las diferentes concentraciones semanalmente, realizando nuevamente los ensayos con cada cambio. Los parámetros analizados fueron, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH, Oxígeno Disuelto (OD), Color, Turbidez, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables y Coliformes fecales, conforme a las técnicas analíticas estandarizadas publicadas por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WPC. Se elaboraron planillas para el registro de los resultados obtenidos, se evaluó el resultado de la reducción de las cargas contaminantes y el aumento de peso húmedo de las plantas.

Análisis de datos: el software utilizado fue el Excel, en el cual se realizaron los gráficos con los datos obtenidos de cada ensayo, también la prueba *t* para dos muestras suponiendo varianzas desiguales, los criterios aplicados fueron los siguientes: 1- Valor experimental > Valor tabulado se rechaza la H_0 (hipótesis nula) y 2- Valor experimental < Valor tabulado se acepta la H_0 (hipótesis nula).

Resultados y discusión

Los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que fueron evaluados son: Temperatura de agua, Oxígeno disuelto (OD), Demanda química de oxígeno (DQO), Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), pH, Turbidez, Color, Sólidos suspendidos totales (SST), Sólidos sedimentables y Coliformes fecales, antes y después del tratamiento para las diferentes concentraciones de agua residual. Se obtuvieron los siguientes resultados según la Tabla 1 de promedios. En el gráfico (Fig.1) de peso húmedo de cada recipiente, se puede notar que a menor con-

**Figura 1.** Diferencia de biomasa de *Pistia stratiotes*.

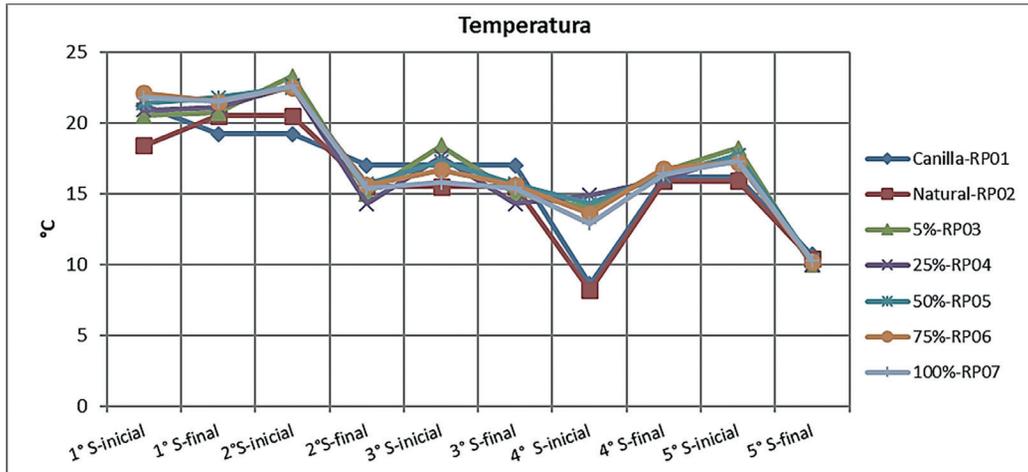


Figura 2. Variación de Temperatura durante la investigación.

centración del efluente hubo un aumento del peso (biomasa), fue menor en el efluente concentrado, como así también se notó una disminución del peso en las concentraciones de 50% y 75% debido a que disminuyó la cantidad de plantines en el transcurso de las semanas. Las temperaturas se encuentran por debajo de los 20°C ya que fue realizado en épocas de invierno (Fig. 2).

Hubo un notorio aumento del OD (Fig. 3), las aguas se quedaron súper saturadas, valores del orden de los 14 mgO₂/L, en el transcurso de las semanas los valores del OD fueron aumentando

entre los 7.0 mgO₂/L y 14 mgO₂/L, recién en la quinta semana se notó una disminución drástica en la concentración del OD en los recipientes de 50%, 75% y 100%. Existen varios factores que afectan la concentración del oxígeno disuelto en un ambiente acuático. Dichos factores incluyen: temperatura, flujo de la corriente, presión del aire, plantas acuáticas, materia orgánica en descomposición y actividad humana. La concentración de oxígeno disuelto puede oscilar entre 0 a 15 mg/L.

A la luz de los resultados, se pudo observar una diferencia entre el valor inicial y final de todos los

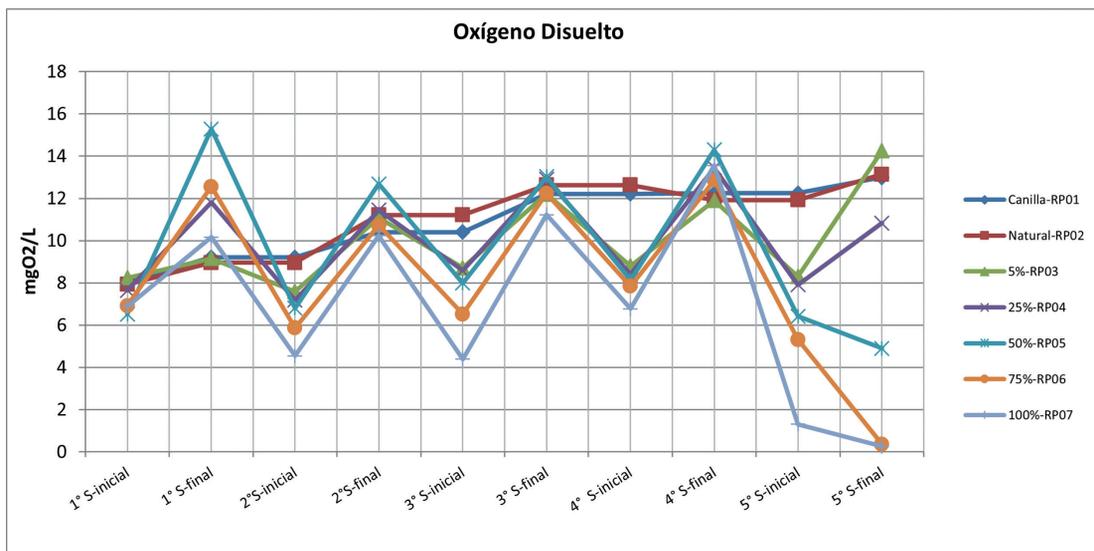


Figura 3. Oxígeno Disuelto (OD).

parámetros estudiados. En el caso de la DQO y DBO5, que son los principales indicadores de contaminación por materia orgánica se observa una leve reducción, pero casi insignificante en comparación en lo estudiado por Ayala *et al.*, (2018) en la que se evidenció para ambos casos un 84% considerando un tiempo de exposición mayor a la de este trabajo (8semanas). Con respecto a la remoción de la turbidez, Lu Q. *et al.*, (2010), obtuvo un 65% utilizando *Pistia stratiotes* como fitorremediador, en tanto que en éste trabajo utilizando la misma especie se obtuvo un porcentaje similar para la concentración de 50%, pero porcentajes menores en las demás concentraciones utilizadas. Ayala *et al.*, (2018) demostró una variación del pH en promedio 18% utilizando *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*, mientras que en éste estudio la variación fue insignificante. Con respecto a los Coliformes fecales se observó que hubo remoción del 100 % para la concentración del 5%, en tanto que para las demás diluciones la remoción fue menor y Ayala *et al.*, (2018) obtuvo una remoción del orden del 93%. En cuanto al color se pudo observar un aumento que incluso ha tomado una tonalidad verdosa.

Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados estadísticos (ver Anexo 1) de los valores del tes *t*, podemos concluir que no hubo remoción significativa de los parámetros fisicoquímicos y microbiológico analizados en las distintas concentraciones utilizadas (5, 25, 50, 75 y 100) %, debidas quizás al tiempo de exposición de la *Pistia stratiotes* L., que fue de una semana y luego se realizó la reposición del agua. Cabe resaltar el alto aporte de oxígeno disuelto que es muy importante para la vida acuática. Queda pendiente continuar con ésta línea de trabajo en épocas de primavera y extendiendo el periodo de contacto de las plantas con el agua residual. Se pudo observar además la resistencia de las plantas a bajas temperaturas y a diferentes concentraciones.

Agradecimientos

Al Decano MSc. Constantino Nicolás Guefos, de

la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por prestarnos sus instalaciones para la ejecución del proyecto. Al investigador, MSc. Francisco Paulo Ferreira Benítez por su apoyo en la realización e interpretación de los resultados estadísticos.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Andrade, C.E., Cáceres, A.B., Vera, A.L., & Morales, E.D. (2019). Tolerancia de las plantas acuáticas *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* al cromo hexavalente en medio acuoso. *Revista de la Facultad de Agronomía de La Universidad del Zulia*, 36(4): 343-365.
- APHA-AWWA-WPC. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (21st Ed.). Washington DC: APHA Press. 1368 pp.
- Beentje, H.J., Drius, M. & Gupta, A.K. (2017). *Pistia stratiotes*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2017*: e.T168937A84295055. [Consulted: 5.ii.2018]. <<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-1.RLTS.T168937A84295055.en>>.
- Benítez, S.V.B., Zapata, J.C.C., & Ramírez, N.J.A. (2008). Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las macrófitas *Pistia stratiotes* y *Egeria densa* en un sistema batch. *Gestión y Ambiente*, 11(2): 39-48.
- Croat, T.B. & Carlsen, M. (2003). Araceae. *Flora del Bajío y de regiones adyacentes*, 114: 1-35.
- da Silva Pinto, L.É., de Freitas Câmara, M.Y., de Freitas, F.B.A., Pinto, F.G.H.S., dos Santos, A.G.D. & Martins, D.F.F. (2015). Determinação da Potencialidade de Utilização da *Pistia stratiotes* como Agente Fitorremediador de Ambientes Naturais. 5º Encontro Regional de Química & 4º Encontro Nacional de

- Química. *Blucher Chemistry Proceedings*, 3(1): 1–11.
- Das, S., Goswami, S. & Talukdar, A.D. (2013). A study on cadmium phytoremediation potential of water lettuce, *Pistia stratiotes* L. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 92(2): 169-174.
- Dray, F.A. & Center, T.D. (2002). Waterlettuce. Pp. 65–78, in Van Driesche, R., Lyon, S., Blossey, B., Hoddl, M. & Reardon, R. (Eds.). *Biological Control of invasive Plants in the Eastern United States*. Morgantown: USDA Forest Service Publication FHTET2002-04. iv + 413 pp.
- Lallana, V.H. (1997). Las plantas acuáticas del río Paraná: *su importancia en el ecosistema*. Artículo Técnico de Divulgación (Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad de Entre Ríos), 1: 1 – 3.
- Lu, Q., He, ZL, Graetz, DA, Stoffella, PJ y Yang, X. (2010). Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *Environmental Science and Pollution Research International*, 17(1): 84–96.
- Martelo, J. & Borrero, J. A. L. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y ciencia*, 8(15): 221–243.
- Neuenschwander, P., Julien, H. M., Center, T. D., Hill, P. M. (2009). *Pistia stratiotes* L. (Araaceae). Pp. 332–352 in Muniappan, R., Reddy, G.V.P. & Raman, A. (Eds.). *Biological Control of Tropical Weeds using Arthropods*. Cambridge: Cambridge University Press. xii + 495 pp.
- Sierra Ramírez, C.A. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Medellín: Ediciones de la U. 457 pp.
- Rodrigues, A.C.D., Rocha, M.V.C., Lima, E.S.A., Pinho, C.F.D., Santos, A.M.D., Santos, F.S.D. & Amaral Sobrinho, N.M.B. (2020). Potential of water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) for phytoremediation: physiological responses and kinetics of zinc uptake. *International Journal of Phytoremediation*, 22(10): 1019–1027.
- Tocto, R.Y.A., Ordoñez, E.C., Rascón, J. & Silva, R.C. (2018). Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 2(3): 48–53.

ANEXO I

Resultados de la Prueba t de Student

OD	H0= Las plantas no aportan OD			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
RP01	0,9159	1,8595	$t exp < t tab$	acepta
RP02	0,9020	1,8595	$t exp < t tab$	acepta
5%-RP03	3,9743	2,0150	$t exp > t tab$	rechaza
25%-RP04	7,6474	1,9432	$t exp > t tab$	rechaza
50%-RP05	2,5883	2,1318	$t exp > t tab$	rechaza
75%-RP06	1,3481	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	1,7187	1,9432	$t exp < t tab$	acepta

DQO	H0= Las plantas no remueven la DQO			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
5%-RP03	0,5937	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
25%-RP04	0,6042	2,0150	$t exp < t tab$	acepta
50%-RP05	0,5281	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
75%-RP06	0,5743	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	0,5625	2,1318	$t exp < t tab$	acepta

DBO5	H0= Las plantas no remueven la DBO5			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
5%-RP03	0,0786	1,8595	$t exp < t tab$	acepta
25%-RP04	0,6719	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
50%-RP05	0,5392	2,0150	$t exp < t tab$	acepta
75%-RP06	0,6705	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	0,6520	2,0150	$t exp < t tab$	acepta

Turbidez	H0= Las plantas no remueven la turbidez			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
5%-RP03	0,4674	2,0150	$t exp < t tab$	acepta
25%-RP04	0,0947	1,8595	$t exp < t tab$	acepta
50%-RP05	1,5647	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
75%-RP06	0,0470	1,8595	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	1,6635	1,9432	$t exp < t tab$	acepta

S. Sed.	H0= Las plantas no remueven los sólidos sedimentables			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
5%-RP03	1,0000	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
25%-RP04	0,7412	1,9432	$t exp < t tab$	acepta
50%-RP05	1,0574	2,0150	$t exp < t tab$	acepta
75%-RP06	0,4576	1,8946	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	0,3969	1,8595	$t exp < t tab$	acepta

Coli Fecal	H0= Las plantas no remueven los coliformes fecales			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
5%-RP03	1,0000	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
25%-RP04	0,8971	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
50%-RP05	0,4949	1,9432	$t exp < t tab$	acepta
75%-RP06	0,8274	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	1,0712	2,1318	$t exp < t tab$	acepta

SST	H0= Las plantas no remueven los SST			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
5%-RP03	0,3594	1,9432	$t exp < t tab$	acepta
25%-RP04	0,8212	1,9432	$t exp < t tab$	acepta
50%-RP05	1,2743	2,0150	$t exp < t tab$	acepta
75%-RP06	0,8979	1,9432	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	1,2922	1,8946	$t exp < t tab$	acepta

pH	H0= Las plantas no modifican el pH			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
5%-RP03	0,4671	1,8595	$t exp < t tab$	acepta
25%-RP04	0,4217	1,9432	$t exp < t tab$	acepta
50%-RP05	0,3692	1,8595	$t exp < t tab$	acepta
75%-RP06	0,1488	1,8595	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	0,6812	1,8595	$t exp < t tab$	acepta

Color	H0= Las plantas no remueven el color			
	<i>t exp</i>	<i>t tab</i>	criterio	
5%-RP03	1,2060	2,0150	$t exp < t tab$	acepta
25%-RP04	0,4233	1,8946	$t exp < t tab$	acepta
50%-RP05	1,8477	2,1318	$t exp < t tab$	acepta
75%-RP06	1,5310	2,0150	$t exp < t tab$	acepta
100%-RP06	0,3841	1,8595	$t exp < t tab$	acepta

Análisis de la distribución espacial de parches de vegetación en Médanos del Chaco: Posibles indicios de un cambio de régimen catastrófico

Analysis of the Spatial Distribution of Vegetation Patches in Chaco Sand Dunes: Possible Indicators of Catastrophic Regime Shift

Rubén Fernández^{1,*} & Gustavo Mereles Menesse²

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física, San Lorenzo, Paraguay.

²Universidad de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Departamento de Física, Ribeirão Preto, SP, Brasil.

Autor correspondiente: mereles930@gmail.com.

Resumen: Los cambios de régimen catastrófico en ecosistemas son generalmente de difícil reversión y a menudo traen consigo consecuencias ecológicas y socioeconómicas devastadoras, siendo la desertificación un ejemplo extremo y preocupante de este tipo de fenómenos. Pese a la dificultad para predecir estos fenómenos, en las últimas décadas se han propuesto modelos teórico-matemáticos que buscan capturar los mecanismos fundamentales subyacentes, proporcionando indicadores mensurables para identificar de manera temprana la ocurrencia de estos procesos. En ecosistemas secos, los modelos sugieren que cambios de régimen a estados desertificados están relacionados con la emergencia de patrones espaciales en la vegetación, análogos a lo observado en transiciones de fase en sistemas físicos. Combinando el análisis de imágenes satelitales y simulaciones en un modelo mínimo, se analizó la relación entre las características de los parches de vegetación de Médanos del Chaco, una de las regiones más secas del Paraguay, y un proceso de cambio de régimen catastrófico a un estado desértico. Mediante el estudio de la distribución de tamaños de parches de vegetación se identificó la presencia de un patrón libre de escala, caracterizado por una distribución que se ajusta a una ley de potencia. Además, se observó una alta correlación y varianza espacial en la densidad de vegetación en comparación con regiones menos secas, siendo estos indicadores de una transición de régimen según el modelo estudiado. Las características espaciales de la vegetación de Médanos del Chaco son compatibles con condiciones de cuasi-criticidad teóricas, sugiriendo que la región se encuentra próxima a un cambio de régimen catastrófico.

Palabras clave: *ecosistemas, cambios de régimen catastrófico, desertificación, patrones espaciales de vegetación, Médanos del Chaco.*

Abstract: Catastrophic regime shifts in ecosystems are generally difficult to predict and often leads to negative ecological and socioeconomic consequences. In addition, they are generally difficult to reverse; desertification is an extreme and worrying example of this type of phenomenon. Despite the difficulty to predict these phenomena, in recent decades, theoretical-mathematical models that seek to capture the fundamental underlying mechanisms have been proposed, providing measurable indicators to identify the occurrence of these processes early. In dry ecosystems, models suggest that regime shifts to desert states can be related to the emergence of spatial patterns of vegetation, similar to those observed in phase transitions in physical systems. Combining satellite images analysis and simulations of a minimal model, the relationship between the characteristics of vegetation patches in Médanos del Chaco, one of the driest regions of Paraguay, and a catastrophic regime shift process to a desert state was analyzed. By studying the size distribution of vegetation patches, the presence of a scale-free pattern was identified, characterized by a power law distribution. In addition, high spatial correlation and spatial variance in the density of vegetation in relation to less dry regions was observed. The spatial characteristics of the vegetation of Médanos del Chaco are compatible with theoretical quasi-critical conditions, suggesting that the region is close to a catastrophic regime change.

Key words: *ecosystems, catastrophic shifts, desertification, vegetation spatial patterns, Médanos del Chaco.*

Introducción

Los ecosistemas están expuestos a cambios graduales en sus condiciones ambientales como la temperatura, los niveles de precipitación, la disponibilidad

de nutrientes, la diversidad de especies, etc. Aunque suele asumirse que la respuesta de los ecosistemas a estos cambios también es gradual, se ha demostrado que cambios ligeros en estas condiciones pueden

Recibido: 02/09/2022 Aceptado: 14/04/2023



llevar a cambios de régimen catastróficos, es decir, transformaciones drásticas en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Estas transiciones a menudo están acompañadas de consecuencias ecológicas y socioeconómicas negativas y, además, muy difíciles de predecir y revertir (Scheffer *et al.*, 2001). Los cambios de régimen no solo pueden llevar a ecosistemas degradados, sino también a sociedades empobrecidas (Cooper *et al.*, 2020).

Modelos teóricos han dado lugar al establecimiento de métodos de alerta temprana ante cambios de régimen catastróficos. Se han propuesto diferentes indicadores, todos asociados a observables macroscópicos como la correlación varianza espacial y temporal de la densidad de vegetación (Fort *et al.*, 2010; Dakos *et al.*, 2010), la emergencia de patrones particulares en la distribución espacial de la vegetación (Kéfi *et al.*, 2014) y la ralentización en los tiempos de recuperación de los ecosistemas (ralentización crítica), siendo esta última la más difícil de medir, pues requiere un muestreo continuo y de larga duración, lo que puede resultar prohibitivo en cuanto a costos y tiempo. El análisis espacial, por su lado, se presenta como la opción más viable.

Considerando la relación entre características espaciales de la vegetación y las transiciones a estados desertificados, Kéfi *et al.* (2014) han sugerido una metodología de análisis basada prioritariamente en información espacial de la vegetación en ecosistemas áridos y semiáridos. Esta metodología recomienda primeramente clasificar el ecosistema en función al tipo de patrón espacial que presenta la vegetación y, a partir de esta clasificación, se proponen los indicadores espaciales más convenientes para la detección de cambios de régimen catastróficos, considerando los mecanismos de interacción asociados a la emergencia de cada tipo de patrón espacial.

Además del desarrollo de indicadores y señales de alerta temprana, existe también una creciente literatura sobre manejo y mitigación del impacto de cambios de régimen catastróficos en ecosistemas áridos y semiáridos, en bosques tropicales e incluso en la explotación de pasturas para emprendimientos ganaderos (Fort *et al.*, 2010; Dieguez y Fort, 2017;

Vidiella *et al.*, 2018; Vidiella *et al.*, 2020; van den Elsen *et al.*, 2020; Fort *et al.*, 2021; Berdugo *et al.*, 2022). Estas propuestas se valen no solo de datos de campo, sino también de modelos teóricos que contemplan los principales mecanismos de interacción entre elementos de un ecosistema, permitiendo estudiar escenarios y definir estrategias para la prevención, manejo, y/o mitigación de cambios de régimen mediante simulaciones computacionales.

La literatura sobre cambios de régimen catastróficos se concentra principalmente en ecosistemas áridos y semiáridos, esto debido a la vulnerabilidad que presentan estos ecosistemas ante la desertificación. En Paraguay, los niveles de precipitación de la mayor parte del territorio hacen poco plausibles procesos de desertificación catastróficos como los estudiados en la literatura actual, no obstante, una excepción es la región noroeste del Chaco paraguayo, donde se encuentra la ecorregión Médanos del Chaco. Esta ecorregión alberga el Parque Nacional Médanos del Chaco, la segunda área protegida más grande de la Región Occidental (Gill *et al.*, 2020). Los niveles de precipitación registrados en la región alcanzan los 400-500 mm anuales, los más bajos del país, y la permanencia de cuerpos de agua es también de las más bajas. Además, en esta región —así como en una parte importante del noroeste del Chaco— se miden los mayores promedios anuales de velocidad de viento del país: aproximadamente 6,5 m/s a 80 m de altura (Gill *et al.*, 2020); el viento, al arrastrar las capas superficiales de tierra fértil, es un factor agravante de la degradación del suelo. Estas características vuelven a Médanos del Chaco una ecorregión sumamente vulnerable. Si bien existen estudios sobre sus características climáticas y ecológicas, se desconocen estudios dentro del marco teórico y metodológico de los cambios de régimen.

En este trabajo se estudiaron las características espaciales de la vegetación de Médanos del Chaco, enmarcando el análisis en la teoría de cambios de régimen catastróficos. Combinando el análisis espacial a partir de imágenes satelitales y los resultados obtenidos mediante simulaciones computacionales, se buscó determinar el estado actual del ecosistema

respecto a un proceso de cambio de régimen catastrófico. Los resultados obtenidos muestran que los patrones espaciales observados en la vegetación son compatibles con un sistema en la región de transición a un régimen de baja densidad de vegetación (desértico). No obstante, estos resultados deben considerarse como una primera aproximación al estudio de cambios de régimen catastróficos en este ecosistema, requiriéndose estudios más detallados y el desarrollo de modelos más elaborados que permitan contrastar, en varios frentes, los procesos teóricos con la evidencia empírica.

Materiales y métodos

La investigación fue desarrollada en tres etapas: la primera consistió en la obtención y análisis de imágenes aéreas y/o satelitales; la segunda en la generación de patrones de distribución de vegetación a partir de simulaciones computacionales de un modelo mínimo, y la tercera, en una comparación entre la estructura espacial de los parches de vegetación observados en campo y en el modelo.

Para la recopilación de las imágenes satelitales se consideró una región circular de 14 km de diámetro dentro del Parque Nacional Médanos del Chaco. A través de Google Earth Pro se seleccionaron manualmente 5 imágenes (sin superposición) [Google Earth, 2008a; 2008b; 2008c; 2008d; 2008e] de diferentes zonas de esta región, todas tomadas en septiembre del año 2008, con cada imagen cubriendo aproximadamente 1,13 km² de terreno. Las referencias de estas imágenes se incluyen en la sección de referencias de esta publicación. Posteriormente, las imágenes fueron binarizadas.

La binarización constó de dos partes: primero, la normalización e inversión del canal R (rojo en el modelo de color RGB) y, luego, el establecimiento de un valor umbral de densidad de vegetación X_u que separe las fases de vegetación y de suelo desnudo. El objetivo de la normalización de uno de los canales RGB es asociar la “intensidad” de color en cada píxel con un valor de densidad de vegetación mediante un número adimensional entre 0 y 1 (ver Figura 1.b). Se normalizó el canal R debido a que se obtuvieron mejores resultados que con los canales

G y B. Aun cuando los canales RGB no responden a longitudes de onda específicas del espectro electromagnético, la inversión del canal R se fundamentó en la siguiente suposición: el color rojo es reflejado en mayor medida por el suelo desnudo y absorbido en mayor medida por la vegetación, por lo tanto, valores bajos de R indicarían presencia de vegetación, y valores altos, suelo desnudo. X_u se determinó mediante el método de Multi-Otsu (Liao *et al.*, 2001) disponible en el paquete Scikit-Image para lenguaje Python. Este método segmenta las imágenes en tres fases (ver Figura 1.c), considerando dos valores umbral; para obtener solo dos fases, se definió a X_u como el menor de estos valores. Así, valores de densidad de vegetación inferiores a X_u indican suelo desnudo y valores superiores indican presencia de vegetación (ver Figura 1.d).

Una vez binarizadas las imágenes, se determinó la distribución de tamaños de los parches, no siendo considerados los parches que atraviesan la imagen de extremo a extremo (parches percolantes) —una práctica común en teoría de percolación. La obtención de la distribución de probabilidad de áreas de los parches permite comparar las observaciones en campo con las estructuras de parches vistas en el modelo mínimo. La distribución obtenida fue ajustada a una ley de potencia o función potencial $P(A)=cA^{-\gamma}$, donde A es el tamaño de cada parche, P es la probabilidad de ocurrencia asociada a un cierto tamaño, γ es el exponente crítico de la función y c es una constante de proporcionalidad. El ajuste se llevó a cabo mediante el método de mínimos cuadrados utilizando el paquete estadístico Scipy para lenguaje Python. Un procedimiento similar al utilizado aquí fue aplicado por Meloni *et al.* (2019) para el estudio de la distribución de parches de vegetación en ecosistemas semiáridos del sur de España y Estados Unidos.

Considerando que la búsqueda por leyes de potencia en datos de campo y/o experimentales es problemática (Buchanan, 2008), y a día de hoy no existe consenso respecto a cómo debe encararse el análisis estadístico. Para una descripción más detallada de las estructuras de parches observadas en campo y en el modelo, se calcularon la probabi-

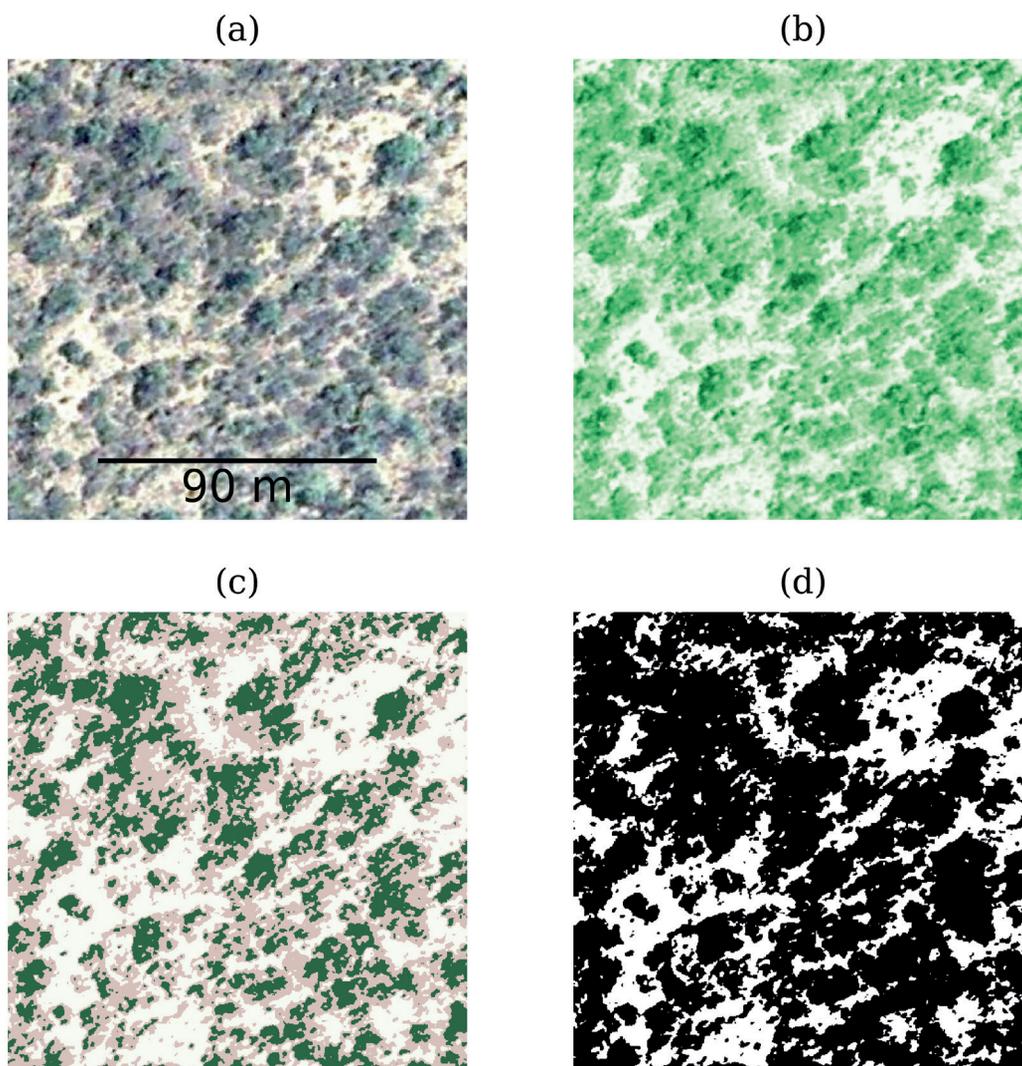


Figura 1. Binarización de imágenes. **a)** Recorte de imagen original obtenida de Google Earth. **b)** Imagen del canal R normalizado e invertido en escala de verdes. **c)** Segmentación mediante método de Multi-Otsu. Se obtienen tres fases: suelo desnudo (blanco), vegetación de baja densidad (marrón) y vegetación de alta densidad (verde). **d)** Imagen binarizada. Se obtienen dos fases: suelo desnudo (blanco) y vegetación (negro). Fuente: adaptado de Google Earth, 2008.

alidad de que un sitio esté ocupado por vegetación y la probabilidad de que un sitio aleatorio pertenezca al parche percolante. La primera es conocida en la literatura de teoría de percolación como densidad de ocupación ρ , mientras que la segunda, como fuerza P del parche infinito (Stauffer y Aharony, 1994).

Finalmente, se determinaron también la correlación espacial C_2 y la varianza espacial σx^2 de los parches en las imágenes binarizadas y en el

modelo, y se evaluó el comportamiento cualitativo de estos parámetros en función a diferentes densidades de ocupación. La correlación espacial y la varianza espacial son importantes indicadores de una transición de fase, ya que los modelos teóricos muestran un máximo en ambos observables en el punto crítico de una transición (Fort *et al.*, 2010; Dakos *et al.*, 2010). Siguiendo la recomendación de Dakos *et al.* (2010), en este estudio se optó por

utilizar el coeficiente de Moran como medida de correlación espacial.

Para la elección de un modelo teórico capaz de describir un cambio de régimen catastrófico se buscó simplicidad y el menor número posible de parámetros libres. Bajo estos criterios se optó por un modelo mínimo (Fort *et al.*, 2010) definido por la ecuación

$$\frac{dX(x, y, t)}{dt} = X(x, y, t) \left(1 - \frac{X(x, y, t)}{K(x, y, t)} \right) - c(t) \frac{X(x, y, t)^2}{1 + X(x, y, t)^2} + D \left(\frac{\partial^2 X(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X(x, y, t)}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

Donde X es la densidad de vegetación o densidad de biomasa (variable de estado), K es la capacidad de carga del sistema, c es la tasa de consumo o decaimiento de la vegetación y D es un coeficiente de difusión.

El modelo descrito por la ecuación (1) sin el término difusivo, fue propuesto inicialmente por Noy-Meir (1975) y May (1977) para describir la transición de un sistema de pastura bajo sobreexplotación cuando se supera un umbral crítico en la tasa de consumo c . No obstante, el modelo es capaz de describir de forma sencilla la dinámica de una población biológica independientemente del sistema. El primer término describe un crecimiento logístico acotado por la capacidad de carga del sistema, el segundo, la tasa de consumo, muerte o decaimiento de la población, y el tercer término es un término difusivo que introduce interacción espacial en el modelo, donde D es el parámetro que determina la conectividad del sistema (Dakos *et al.*, 2010).

Además de la búsqueda de simplicidad, la elección del modelo y del parámetro de control se fundamentó en algunas hipótesis. Por un lado, se parte de la posibilidad de que Médanos podría presentar distribuciones de tamaños de parches de vegetación libres de escala. Además, es razonable suponer que en condiciones de escasez de recursos como agua o

nutrientes existe una relación entre el decrecimiento de la capacidad de carga y la emergencia de mecanismos de reorganización determinantes para la formación de patrones libres de escala —patrones que han sido reportados anteriormente en el modelo seleccionado (Fort, 2010). Por otro lado, la tasa de consumo o decaimiento c se considera baja y de variabilidad mínima, pues no existen allí actividades humanas de explotación ganadera y forestal; a partir de esto puede considerarse que variaciones en la densidad de vegetación, así como posibles cambios de régimen, se deberían principalmente a cambios en la capacidad de carga del ecosistema. Así, se supone que el modelo seleccionado es adecuado y se propone al valor medio de $K(x, y)$ como parámetro de control en las simulaciones.

Las simulaciones se realizaron mediante la implementación del modelo como autómatas celulares (Fort, 2020). Se mantuvieron valores de c menores a 1.8 y valores de d entre 0.1 y 0.3. Los valores de los elementos de la matriz de capacidad de carga $K(x, y)$ son aleatorios y se obtienen a partir de una distribución uniforme con valores en el intervalo $[\langle K \rangle - \delta K, \langle K \rangle + \delta K]$, siendo $\langle K \rangle$ la capacidad de carga media y $\delta K = 0.5$. La simulación se efectuó inicializando el sistema con una capacidad de carga media igual a 10, iterando el sistema por 500 pasos de tiempo para permitir su estabilización. Luego, durante 1000 iteraciones, se procedió a reducir gradualmente la capacidad de carga media hasta alcanzar un valor de 4, simulando la transición de un estado de alta densidad de vegetación a uno de baja densidad. Seguidamente, durante las próximas 1000 iteraciones, se volvió a incrementar la capacidad de carga media hasta alcanzar el valor inicial 10; de esta manera se obtiene información sobre la transición inversa, es decir, de un régimen de baja densidad a uno de alta densidad (ver Figura 2). El mismo procedimiento se repitió 100 veces para la obtención de una muestra representativa de la estructura de los parches de vegetación que emergen durante la transición de régimen.

Se analizó la estructura de parches en cinco puntos en la región de transición de alta a baja densidad de vegetación: el correspondiente al

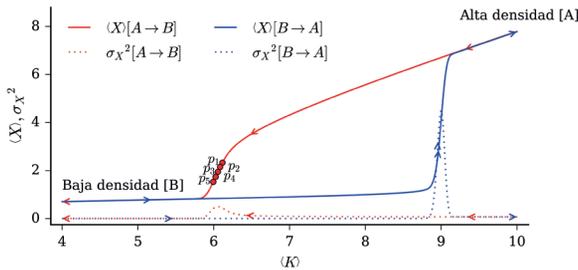


Figura 2. Diagrama de bifurcación del modelo para $d = 0.2$ y $c = 1.75$. Las curvas continuas corresponden a la densidad de vegetación promedio $\langle X \rangle$, y las curvas discontinuas, a la varianza espacial σ_X^2 . Se visualizan trayectorias de un régimen de alta densidad de vegetación a uno de baja densidad (en rojo) y de baja densidad a alta densidad (en azul). Es posible observar el fenómeno de histéresis, en el que la transición del régimen de alta a baja densidad sigue una trayectoria distinta al caso opuesto (baja-alta). En la región intermedia ($\langle K \rangle$ entre 6 y 9) existen dos estados estables alternativos, uno de alta densidad y otro de baja densidad.

punto crítico (definido como el valor medio de K para el cual la varianza σ_X^2 es máxima), dos puntos subcríticos (pertenecientes a la región de transición y anteriores al punto crítico) y dos puntos supercríticos (pertenecientes a la región de transición y posteriores al punto crítico); estos se indican en el diagrama de bifurcación presentado en la Figura 2. Finalmente, para cada configuración espacial obtenida se determinó la distribución de las áreas de los parches.

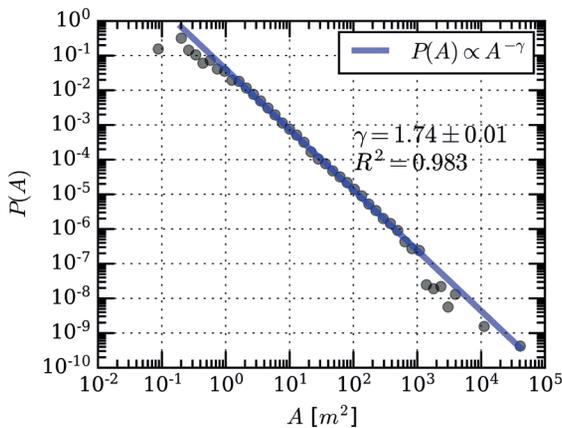


Figura 3. Distribución de tamaños de parches de vegetación para las imágenes satelitales. **Puntos:** medidas experimentales. **Línea celeste:** curva de ajuste (ley de potencia).

Para obtener la fuerza del parche percolante, la correlación espacial y la varianza espacial en función a la capacidad de carga y la densidad de ocupación se analizaron todos los puntos en el intervalo de capacidad de carga media de 7 a 5 de la transición A a B.

Resultados y discusión

Distribución de áreas de parches de vegetación

En la Figura 3 se presenta la distribución obtenida para las imágenes satelitales. En el eje horizontal se indica el área A (en m^2) de los parches de vegetación, y en el eje vertical, la probabilidad P de que un parche escogido al azar tenga un tamaño A ; ambos ejes son mostrados en escala logarítmica. Los puntos representan las medidas experimentales, y la recta, la curva de ajuste definida por una función potencial $P \propto A^{-\gamma}$. Se observó que la distribución de probabilidad de las áreas sigue una ley de potencia en más de tres décadas (10^0 a $10^3 m^2$) con un coeficiente de determinación superior a 0.98. Esto podría ser un indicador de un patrón de vegetación libre de escala, característico durante cambios de régimen (Fort *et al.*, 2010; Kéfi *et al.*, 2014).

Las distribuciones obtenidas mediante simu-

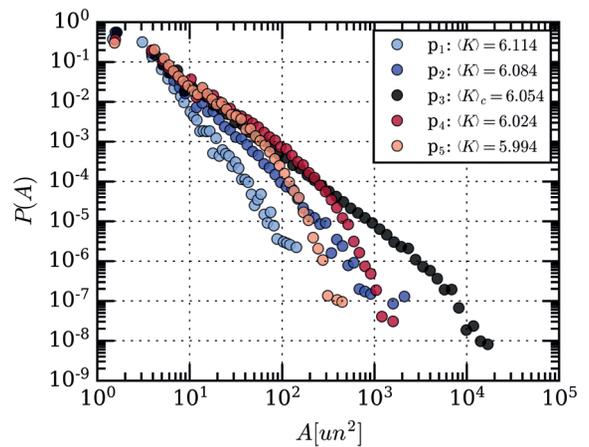


Figura 4. Distribuciones de tamaños de parches para $d = 0.1$ y $c = 1.72$. **Puntos negros:** distribución para el punto crítico (p_3). **Puntos azulados:** distribuciones de áreas para puntos supercríticos $\langle K \rangle \geq \langle K \rangle_c$. **Puntos rojizos:** distribuciones para puntos subcríticos $\langle K \rangle \leq \langle K \rangle_c$. Las áreas se miden en unidades cuadradas de celda.

laciones del modelo mínimo para cada uno de los puntos analizados se muestran en la Figura 4. Como era esperado, la distribución de parches de vegetación en el punto crítico p_3 presenta una distribución en ley de potencia en un rango de más de 3 décadas, un comportamiento conocido para el modelo en cuestión (Fort *et al.*, 2020).

Distribuciones para puntos críticos (P_3) en simulaciones con diferentes valores de conectividad $d = 0.1$, $d = 0.2$ y $d = 0.3$ (manteniendo $c = 1.75$) con sus correspondientes curvas de ajuste y valores de γ y R^2 se presentan en la Figura 5. Las distribuciones se muestran similares a las observadas en campo, principalmente para los casos $d = 0.1$ y $d = 0.2$, donde la diferencia entre exponentes observados en campo y simulados es de apenas 0.02; luego, la distribución espacial observada en la vegetación de Médanos posee características que encajan con las distribuciones correspondientes a estados de vegetación en el entorno de la región crítica (cambio de régimen).

Estos resultados son similares a los resultados teóricos obtenidos por Kéfi *et al.* (2007) al estudiar ecosistemas áridos del Mediterráneo. En dicho trabajo se analizó la distribución de tamaños de parches de vegetación empleando un modelo de autómatas celulares de mayor complejidad que el modelo mínimo. Las distribuciones de áreas teóricas para un sistema con alta interacción local positiva (que involucra facilitación local y dispersión de semillas) y baja presión de pastoreo corresponden a leyes de potencia con exponentes entre 1.75 y 1.77, valores próximos a los observados para datos de campo en Médanos y en las simulaciones del modelo mínimo.

Es importante resaltar que la distribución de áreas obtenida por Kéfi *et al.* (2007) mediante mediciones de campo en Gata-Níjar, España (una de las regiones más secas de Europa), en Uta, Grecia y Timahdite, Marruecos, se observan leyes de potencia menos claras (ajustadas a menos de una década) con exponentes inferiores a 1.3, una diferencia mayor a 0.4 a los exponentes teóricos obtenidos mediante el modelo propuesto por los autores. En efecto, tanto el modelo mínimo utilizado en esta investigación

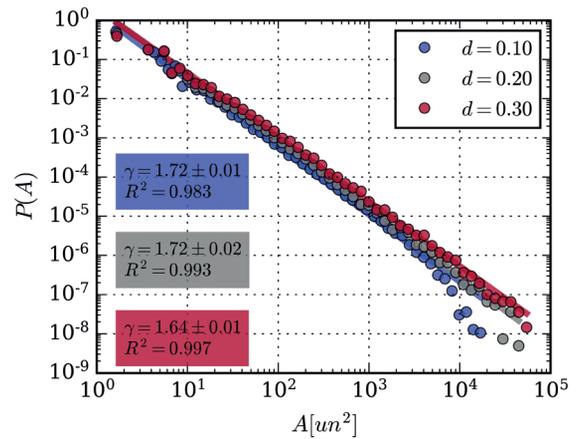


Figura 5. Distribuciones de tamaños de parches para $c = 1.75$ y distintos valores de coeficiente de conectividad d . **Azul:** $d = 0.10$. **Gris:** $d = 0.20$. **Rojo:** $d = 0.30$. Se muestran los exponentes obtenidos y el coeficiente de determinación. Para coeficientes de conectividad baja se obtiene el mismo exponente y cercano a lo observado en campo.

como el modelo propuesto por Kéfi *et al.* (2007) coinciden con una diferencia menor a 0.05 con los datos de campo observados en Médanos; en todos los casos el exponente que caracteriza la ley de potencia se encuentra en un intervalo entre 1.72 y 1.77. Proponemos aquí que esto se debe a que en los ecosistemas áridos y semiáridos del Mediterráneo estudiados por Kéfi *et al.* (2007), la vegetación ya ha atravesado el estado crítico, es decir, los ecosistemas se encuentran en estados supercríticos en dirección a un régimen de baja densidad. Observe que la distribución correspondiente al punto p_4 en la Figura 4 se ajusta a una ley de potencia apenas a una década y el exponente es menor a lo observado en el punto crítico. Estas características coinciden con lo observado en los ecosistemas del Mediterráneo.

No obstante, al momento de interpretar estos resultados, habrá que tener en mente que la relación entre leyes de potencia y comportamiento crítico no es unívoca (Touboul y Destexhe, 2017) y los métodos utilizados para obtención de distribuciones de probabilidad en leyes de potencia son problemáticos (Buchanan, 2008). Los resultados referentes a leyes de potencia presentados aquí no están exentos de dichos problemas, por lo que se recomienda tomarlos apenas como un primer indicador, no riguroso, de

un proceso de cambio de régimen. Los análisis de varianza y correlación espacial, así como el estudio de los parches percolantes, presentados a seguir, brindarán una visión más completa respecto a la relación entre modelo y observaciones de campo.

Correlación y varianza espacial de la vegetación

En la Figura 6 se observan dos estados con densidad de vegetación homogénea (fases): uno de alta densidad de vegetación, donde la densidad de ocupación es máxima ($\rho = 1$), y otro de baja densidad de vegetación, donde la densidad de ocupación es nula ($\rho = 0$, pues la densidad de vegetación es inferior al umbral X_u en toda la región $L \times L$). En las regiones homogéneas vemos que tanto C_2 como σ_x^2 son nulas, mientras que presentan valores no nulos en la región de transición con un máximo en torno a la capacidad de carga crítica, región donde la fase del sistema no está bien definida, pues en esta región

se tiene una coexistencia de fases caracterizada por una densidad de ocupación entre 0 y 1.

El comportamiento observado puede explicarse mediante el siguiente razonamiento: en condiciones de abundancia de recursos el “agrupamiento” de la vegetación es menos necesario para su sobrevivencia, por lo que no se forman parches, dando como resultado una distribución espacial de vegetación homogénea y por ende, una correlación espacial nula. A medida que la disponibilidad de recursos disminuye, los mecanismos de interacción (como la facilitación local) provocan una redistribución de la vegetación (Rietkerk, 2004; Kéfi *et al.*, 2014), aumentando el agrupamiento y, por lo tanto, la correlación espacial. Cuando los recursos disminuyen, la densidad de vegetación decrece de forma heterogénea, lo que se traduce en un aumento de la varianza espacial.

El comportamiento de C_2 y σ_x^2 para las imágenes satelitales es coherente con el comportamiento observado en las simulaciones en la región cerca de la transición. Si bien el valor exacto de C_2 observado en campo es superior incluso al pico observado en simulaciones ($C_2 \approx 0.6$), en ambos casos se tiene alta correlación espacial ($C_2 \geq 0.5$), indicador de un cambio de régimen en el sistema (Dakos *et al.*, 2010; Kéfi *et al.*, 2014). Para una misma densidad de ocupación, la varianza espacial observada en campo concuerda exactamente con la varianza espacial obtenida en las simulaciones (ver gráfico interno en Figura 6); esto permite ubicar el ecosistema de la zona estudiada de Médanos en el diagrama de bifurcación del modelo mínimo. Según este análisis, Médanos en el año 2008 (año de obtención de las las imágenes utilizadas) se encontraba en la región de cambio de régimen, no obstante, en un estado todavía subcrítico.

Diferentes regímenes en la percolación de parches de vegetación

En la Figura 7 se presenta la fuerza del parche percolante respecto a la densidad de ocupación obtenida en simulaciones y el valor medido en campo con su respectiva incertidumbre. Observamos que los valores medidos en campo caen

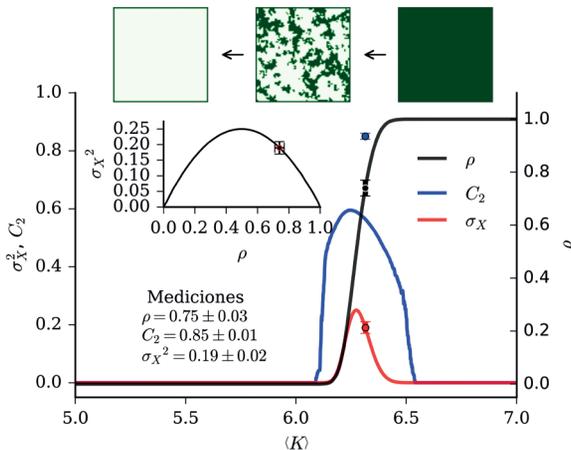


Figura 6. Correlación espacial, varianza espacial y densidad de ocupación en función a la capacidad de carga. Las curvas azul y roja corresponden a la correlación espacial C_2 y la varianza espacial σ_x^2 obtenidas en las simulaciones. La curva negra corresponde a la densidad de ocupación ρ medida en las simulaciones. Se presentan en cuadros los patrones observados en los regímenes de alta ($\rho = 1$) y baja densidad ($\rho = 0$), así como el patrón en estado crítico ($\rho = 0.5$). Los puntos indican medidas en los Médanos incluyendo la incertidumbre. La figura interna muestra la relación entre la varianza y la densidad de ocupación observada en las simulaciones, mientras que el punto es el valor obtenido a partir de imágenes de los Médanos. Parámetros: $c = 1.75$ y $d = 0.1$.

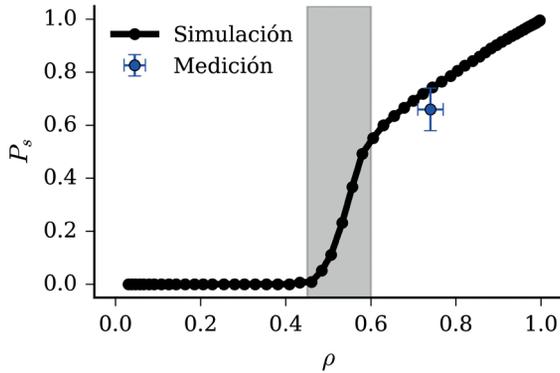


Figura 7. Fuerza del parche percolante vs. densidad de ocupación. La curva sólida son resultados obtenidos en simulaciones con tamaño de sistema $L = 100$, coeficiente de conectividad $d = 0.1$ y tasa de decaimiento $c = 1.75$. Los resultados presentados corresponden a valores medios obtenidos a partir de 100 repeticiones. El punto azul corresponde a la fuerza y densidad media obtenida a partir de las 5 imágenes analizadas, se incluye la desviación estándar respecto a ambas medidas. Las observaciones de campo son coherentes con los resultados observados en la simulación. La región gris corresponde al régimen intermedio, donde se tiene la máxima sensibilidad de la fuerza del parche percolante a la densidad de ocupación.

aproximadamente sobre la curva simulada. Los parches percolantes observados en los Médanos presentan fuerza igual a $P_s = 0.66 \pm 0.08$, mientras que la densidad de ocupación medida es igual a $\rho = 0.74 \pm 0.03$, valores que al ser contrastados con los resultados obtenidos mediante simulación, coinciden con un sistema aproximándose al estado crítico, pero aún en un régimen levemente subcrítico. Estos resultados concuerdan con los obtenidos mediante el análisis de la varianza espacial presentado en la sección anterior.

En este modelo, el umbral de percolación (ρ_c) se encuentra en torno a 0.5, valor diferente al asociado a la clase de universalidad de percolación estándar, lo que es esperado, pues en este sistema, la probabilidad de ocupación de sitios distintos no son estadísticamente independientes, sino que se espera que estén correlacionadas. Discrepancias similares fueron encontradas por Martín *et al.* (2020), donde con un modelo teórico distinto, los autores mostraron que los parches de vegetación durante el cambio de régimen presentan características de percolación distintas a la percolación estándar, además

de ser dependientes de la densidad de vegetación y condiciones ambientales. Los autores afirman que este fenómeno es diferente al estudiado por la teoría de percolación tradicional, por lo tanto, su estudio presenta oportunidades de investigación teórica novedosas y relevantes.

Aun cuando el sistema no pertenezca a la clase de universalidad de percolación estándar, no se puede descartar la posibilidad de encontrar una nueva clase de universalidad capaz de describir este tipo de transiciones. Una investigación a favor de la existencia de una clase de universalidad en sistemas ecológicos fue presentada por Meloni *et al.* (2019). En el mismo, basándose en observaciones realizadas gracias a imágenes satelitales, los autores demostraron que el comportamiento de los patrones de vegetación en el semiárido del sur de España y del estado de Arizona en Estados Unidos son idénticos, evidencia de universalidad.

Meloni *et al.* (2019) afirman que existen tres regímenes diferentes del sistema durante el cambio de régimen catastrófico, asociados a dos transiciones distintas. En el régimen A, régimen de baja densidad de vegetación, las propiedades geométricas de los parches muestran patrones aleatorios y esparsos, donde se maximiza los efectos de la escorrentía hídrica y se minimiza la infiltración de agua en el suelo. En el régimen B, la coalescencia (fusión) direcciona el crecimiento de los parches, lo que conlleva a tamaños y densidades no triviales. Los cambios en el arreglo espacial resultan del incremento en la conectividad de los parches, con consecuencias sobre la escorrentía superficial y favorecimiento de la infiltración de agua en el suelo. El proceso de coalescencia llevaría a la emergencia de parches percolantes provocando la saturación del proceso de coalescencia, lo que lleva a una transición, en este caso del régimen B al C. En el régimen C, emergen correlaciones de largo alcance a partir de los mecanismos de interacción en el ecosistema. La vegetación altamente conectada mitiga los efectos de la escorrentía y mejora considerablemente la absorción de agua por parte de la vegetación. Aquí, los detalles del terreno se hacen irrelevantes y los aspectos biológicos dominan los

patrones presentes en la vegetación.

Meloni *et al.* (2019) no proponen modelos para describir el fenómeno, no obstante, los resultados aquí presentados parecen coincidir respecto a la existencia de más de dos regímenes. Observando la fuerza de percolación respecto a la densidad (ver Figura 7), se observan tres regímenes caracterizados por diferencias en la pendiente de la fuerza de percolación respecto a la densidad de ocupación. El primero, régimen de fuerza nula, en el cual no existen parches percolantes; el segundo, donde la fuerza del parche percolante presenta una alta sensibilidad (pendiente grande) a la densidad de ocupación (aproximadamente entre $0.5 \leq \rho \leq 0.6$); y el tercero, donde la sensibilidad a la densidad de ocupación se reduce considerablemente ($\rho \geq 0.6$).

Aunque el análisis realizado no buscó evidencias para confirmar la existencia de transiciones de fase de primer y segundo orden como lo observado por Meloni *et al.* (2019). Interpretaciones equivalentes respecto a la naturaleza de los regímenes observados pueden utilizarse aquí. El régimen intermedio, donde se tiene mayor sensibilidad de la fuerza de percolación a la densidad de ocupación, respondería al régimen B descrito anteriormente. En él, el aumento de la fuerza de percolación estaría asociado al proceso de coalescencia de parches menores, lo que ocurriría hasta un punto de saturación ($\rho \approx 0.6$), en el cual, ocurre la transición al tercer régimen, con características similares a la descrita por Meloni *et al.* (2019). En este contexto, ecosistemas en los Médanos, se encontrarían en el régimen C, no obstante, estarían próximos a la transición al régimen B, donde los parches percolantes empiezan a reducir drásticamente su tamaño. Este proceso de reducción drástica estaría asociado al comprometimiento del papel de la vegetación en el control de la escorrentía hídrica, y en caso específico de los médanos, en la mitigación del impacto de la erosión eólica.

Los resultados presentados aquí indican que las características observadas en Médanos corresponden a lo esperado para un sistema en pleno proceso de cambio de régimen. No obstante, habrá que considerar las limitaciones de la metodología utilizada en esta investigación al momento de formar

una opinión sobre el estado actual de Médanos. Las imágenes satelitales utilizadas aquí fueron del tipo RGB, por lo que el procedimiento de clasificación y binarización son menos robustos que los obtenidos con imágenes multiespectrales, donde índices como índice de vegetación por diferencia normalizada (NDVI) o el índice de agua por diferencia normalizada (NDWI), pueden ser implementados para identificar y clasificar la vegetación de manera más precisa. Por ello, en trabajos futuros, se propone extender el análisis presentado aquí con imágenes multiespectrales de alta precisión y una validación en campo de la clasificación realizada.

Las imágenes de campo utilizadas en esta investigación datan de más de una década atrás, por lo que podría considerarse que los resultados presentados describen el estado pasado de la vegetación en los Médanos, luego las conclusiones de esta investigación están desfasadas. No obstante, el hecho de que la región estudiada pertenezca a un área protegida, con escasa actividad humana en sus entornos, permite suponer que los datos utilizados aún guardan actualidad. Los procesos de cambio de régimen ocurren a escalas de tiempo humanas (Cooper *et al.*, 2020), no obstante, estas transformaciones, una vez iniciadas, pueden llevar décadas para concluirse, siendo el fenómeno de ralentización crítica responsable por el retardo en la evolución del proceso (Vidiella *et al.*, 2018). Con esto, podemos esperar que los Médanos presenten todavía a día de hoy, patrones similares a los encontrados aquí.

Se propone tomar los resultados presentados aquí como primeros indicios de un cambio de régimen en Médanos del Chaco, afirmación que requiere estudios más detallados para ser corroborada o refutada. Se recomienda realizar campañas de monitoreo de larga duración que busquen indicios de un proceso de ralentización crítica. Considerando que experimentos in situ presentan costos prohibitivos, el procedimiento más viable consiste en realizar mediciones del tiempo de recuperación de la vegetación luego de eventos destructivos como grandes sequías e incendios. Esto podría realizarse mediante imágenes aéreas y/o satelitales tomadas a lo largo

del tiempo, y brindaría evidencia contundente para la hipótesis de un cambio de régimen catastrófico en Médanos, pues la ralentización crítica sería evidencia sólida de un cambio de régimen catastrófico.

Conclusiones

Mediante el análisis de la distribución espacial de la vegetación en Médanos del Chaco y un modelo matemático mínimo, se identificaron características en terreno correspondientes a ecosistemas en proceso de cambio de régimen. La vegetación de Médanos presenta un patrón libre de escala, caracterizado por una distribución de área de parches en leyes de potencia, además de valores altos de correlación y varianza espacial, siendo todos estos indicadores de un cambio de régimen catastrófico.

Los resultados parecen indicar que Médanos del Chaco se encuentra en pleno proceso de desertificación (transición a un sistema con baja densidad de vegetación). No obstante, las mediciones de varianza espacial vs. densidad de ocupación, y la presencia de parches percolantes con fuerza superior a 0.6, indican que el sistema aún no alcanzó el valor crítico para el cambio de régimen, siendo este un resultado esperanzador, pues permitiría definir estrategias para evitar la concreción del cambio de régimen o mitigar sus efectos en caso de que sea inevitable su ocurrencia.

Investigaciones relacionadas al manejo y mitigación de cambios de régimen catastróficos se basan no solo en observaciones de campo, sino que se sustentan en modelos teóricos que permiten dar sentido y contexto a los datos empíricos, evidenciando la utilidad de métodos provenientes de la física estadística y de la teoría de sistemas dinámicos no lineales en el desarrollo de herramientas cuantitativas que ayuden a enfrentar los desafíos existentes en la conservación de ecosistemas y uso de recursos naturales.

Este trabajo presenta un caso concreto donde datos de campo y modelado matemático se complementan para la identificación de procesos que a mediano y largo plazo amenazan los ecosistemas de una de las regiones más frágiles del centro del subcontinente sudamericano. Se recuerda que la

desertificación de Médanos del Chaco no solo pone en riesgo la fauna y flora de esa región, sino que podría extenderse a regiones productivas del Chaco. Luego, estudios predictivos sobre estos procesos son de alta relevancia socioeconómica, claves para la sostenibilidad de las actividades humanas en la región.

Agradecimientos

G. M. agradece a la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior de Brasil por el apoyo financiero. R. F. agradece al profesor Fernando Méndez de la FaCEN-UNA por sus recomendaciones y, principalmente, por su apoyo y motivación para la realización del Trabajo Final de Grado que sirvió de base para este artículo. Los autores agradecen además al profesor Edher Herrera de la FaCEN-UNA por las sugerencias brindadas durante la redacción de este artículo.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Berdugo, M., Vidiella, B., Solé, R.V. & Maestre, F.T. (2022). Ecological mechanisms underlying aridity thresholds in global drylands. *Functional Ecology*, 36(1): 4–23.
- Cooper, G.S., Willcock, S. & Dearing, J.A. (2020). Regime shifts occur disproportionately faster in larger ecosystems. *Nature Communications*, 11(1175): 1–10.
- Dakos, V., van Nes, E. H., Donangelo, R., Fort, H. & Scheffer, M. (2010). Spatial correlation as leading indicator of catastrophic shifts. *Theoretical Ecology*, 3(3): 163–174.
- Dieguez Cameroni, F. & Fort, H. (2017). Towards scientifically based management of extensive livestock farming in terms of ecological predator-prey modeling. *Agricultural Systems*, 153: 127–137.

- Google Earth. (2008a) [10.ix.2008]. Médanos del Chaco. 20°18'49"S, 61°58'35"W. Altura de ojo: 1,73 km. Google Earth. V 7.3.4.8642. MaxarTechnology 2020. [Consulted: 1.vi.2022]. <<http://www.earth.google.com>>.
- Google Earth. (2008b) [10.ix.2008]. Médanos del Chaco. 20°16'54"S, 61°56'39"W. Altura de ojo: 1,73 km. Google Earth. V 7.3.4.8642. MaxarTechnology 2020. [Consulted: 1.vi.2022]. <<http://www.earth.google.com>>.
- Google Earth. (2008c) [10.ix.2008]. Médanos del Chaco. 20°18'16"S, 61°56'44"W. Altura de ojo: 1,73 km. Google Earth. V 7.3.4.8642. MaxarTechnology 2020. [Consulted: 1.vi.2022]. <<http://www.earth.google.com>>.
- Google Earth. (2008d) [10.ix.2008]. Médanos del Chaco. 20°16'47"S, 61°55'2"W. Altura de ojo: 1,73 km. Google Earth. V 7.3.4.8642. MaxarTechnology 2020. [Consulted: 1.vi.2022]. <<http://www.earth.google.com>>.
- Google Earth. (2008e) [10.ix.2008]. Médanos del Chaco. 20°17'41"S, 61°53'12"W. Altura de ojo: 1,73 km. Google Earth. V 7.3.4.8642. MaxarTechnology 2020. [Consulted: 1.vi.2022]. <<http://www.earth.google.com>>.
- Fort, H. & Grigera, T. S. (2021). A new early warning indicator of tree species crashes from effective intraspecific interactions in tropical forests. *Ecological Indicators*, 125(107506): 1–7.
- Fort, H., Mazzeo, N., Scheffer, M. & Van Nes, E. (2010). Catastrophic shifts in ecosystems: Spatial early warnings and management procedures (inspired in the physics of phase transitions). *Journal of Physics: Conference Series*, 246(012035): 1–15.
- Fort, H. (2020). *Ecological Modelling and Eco-physics: Agricultural and Environmental Applications*. Bristol: IOP Publishing. xvi + 300 pp.
- Kéfi, S., Rietkerk, M., Alados, C. L., Pueyo, Y., Papanastasis, V. P., ElAich, A. & De Ruiter, P. C. (2007). Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems. *Nature*, 449(7159): 213–217.
- Kéfi, S., Guttal, V., Brock, W. A., Carpenter, S. R., Ellison, A. M., Livina, V. N., Seekell, D.A., Scheffer, M., van Nes, E.H. & Dakos, V. (2014). Early warning signals of ecological transitions: Methods for spatial patterns. *PLoS ONE*, 9(3)e92097: 1–13.
- Liao, P-S., Chen, T-S. & Chung, P-C. (2001). A fast algorithm for multilevel thresholding. *Journal of Information Science and Engineering*, 17(5): 713–727.
- Martín, P.V., Domínguez-García, V. & Muñoz, M.A. (2020). Intermittent percolation and the scale-free distribution of vegetation clusters. *New Journal of Physics*, 22(8)083014: 1–16.
- May, M. (1977). Thresholds and breakpoints in ecosystems with a multiplicity of stable states. *Nature* 269: 471–477.
- Meloni, F., Nakamura, G.M., Granzotti, C.R.F. & Martinez, A.S. (2019). Vegetation cover reveals the phase diagram of patch patterns in drylands. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 534(122048): 1–9.
- Noy-Meir, I. (1975). Stability of grazing systems an application of predator prey graphs. *Journal of Ecology*, 63(2): 459–482.
- Scheffer, M. & Carpenter, S.R. (2003). Catastrophic regime shifts in ecosystems: Linking theory to observation. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(12): 648–656.
- Stauffer, D. & Aharony, A. (1994). *Introduction To Percolation Theory*. (2nd Ed.). London: Taylor & Francis. 192 pp.
- van den Elsen, E., Stringer, L.C., De Ita, C., Hessel, R., Kéfi, S., Schneider, F.D., Bautista, S., Mayor, A.G., Baudena, M., Rietkerk, M., Valdecantos, A., Vallejo9, V.R., Geeson, N., Brandt, C.J., Fleskens, L., Hemerik, L., Panagos, P., Valente, S., Keizer, J.J., Schwilch, G., Riva, M.J., Sietz, D., Christoforou, M., Hadjimitsis, D.G., Papoutsas, C., Quaranta, G., Salvia, R., Tsanis, I.K., Daliakopoulos, I, Claringbould, H. & de Ruiter, P.C. (2020). Advances in Understanding and Managing Catastrophic Ecosystem Shifts in Mediter-

- ranean Ecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8(561101): 1–20.
- Vidiella, B., Sardanyés, J. & Solé, R. (2018). Exploiting delayed transitions to sustain semiarid ecosystems after catastrophic shifts. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(143)20180083: 1–10.
- Vidiella, B., Sardanyés, J. & Solé, R. V. (2020). Synthetic soil crusts against green-desert transitions: A spatial model: Synthetic ecosystems' terraformation. *Royal Society Open Science*, 7(8)200161: 1–14.

Resolviendo la ecuación del movimiento armónico amortiguado mediante algunos métodos numéricos

Solving the equation of dampening harmonic motion using some numerical methods

Salustiano Vega^{1,*}, Jorge Jara², Osvaldo Vega³ & Crispín Vargas²

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, Departamento de Ciencias Básicas, San Lorenzo, Paraguay.

²Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física, San Lorenzo, Paraguay.

³Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Matemática, San Lorenzo, Paraguay.

*Autor correspondiente: svega@pol.una.py.

Resumen: El modelo del movimiento armónico amortiguado es uno de los temas abordados en el área de la matemática y de física, su representación mediante ecuaciones diferenciales es el motivo principal de su estudio. Usualmente se analiza el caso más simple para obtener una solución analítica real, en el que las técnicas usuales de resolución impartidas para describir el movimiento armónico amortiguado consideran pequeñas intensidades de amortiguamiento. Sin embargo, el análisis mediante ciertos métodos numéricos que resuelven de manera aproximada ecuaciones diferenciales ordinarias permitirá resolver numéricamente este modelo y proporcionar diferentes técnicas de resolución. En este trabajo se resolverán numéricamente la ecuación diferencial que describe el movimiento armónico amortiguado. Se propondrán algunas condiciones iniciales a la ecuación diferencial y se implementarán las funciones ODE23, ODE45 y ODE 113 de *Matlab* y algunos algoritmos numéricos clásicos, tales como los métodos, de *Euler Back* de primer orden, de *Runge Kutta* de segundo orden, de *Adams Moulton* de tercer orden y de *Runge Kutta* de cuarto orden. Se realizará finalmente, una comparación de los algoritmos numéricos y de las funciones de *Matlab* implementadas con la solución analítica exacta de la ecuación diferencial, así como con la solución exacta para la velocidad vertical de la masa.

Palabras clave: Ecuaciones diferenciales, Métodos numéricos, Algoritmo.

Abstract: The model of damped harmonic motion is one of the topics addressed in the area of mathematics and physics, its representation through differential equations is the main reason for its study. The simplest case is usually analyzed to obtain a real analytical solution, in which the usual resolution techniques taught to describe damped harmonic motion consider small damping intensities. However, analysis using certain numerical methods that approximate ordinary differential equations will allow us to solve this model numerically and provide different resolution techniques. In this work, the differential equation that describes the damped harmonic motion will be solved numerically. Some initial conditions for the differential equation will be proposed and the functions ODE23, ODE45 and ODE 113 of *Matlab* and some classical numerical algorithms will be implemented, such as the first-order Euler Back methods, the second-order Runge Kutta method, of Adams Moulton of the third order and de Runge Kutta of the fourth order. Finally, a comparison of the numerical algorithms and the implemented *Matlab* functions will be made with the exact analytical solution of the differential equation, as well as with the exact solution for the vertical velocity of the mass.

Keywords: Differential equations, Numerical methods, Algorithm.

Introducción

La apariencia del movimiento armónico amortiguado generalmente está relacionada con un cuerpo de cierta masa unido a un extremo de una fuente elástica, permaneciendo fijo el otro extremo de dicha fuente. De hecho, es un tema estudiado en modelos matemáticos y físicos.

En términos matemáticos según Costa *et al.*, (2011), el estudio del movimiento armónico amor-

tiguado se desarrolla por medio de las ecuaciones diferenciales que, en la mayoría de los casos, por medio de métodos usuales de resolución, se obtiene una solución analítica para pequeñas intensidades de amortiguamiento.

Los trabajos realizados hasta el momento presentan diferentes enfoques y aplicaciones, por ejemplo, en (Pascual *et al.*, 2008) se realiza una simulación en Maple de la modelación del movimiento tanto

Recibido: 10/02/2023 Aceptado: 14/04/2023



armónico simple como amortiguado, en (Serrano *et al.*, 2016) se presenta un caso del modelado y solución de una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden considerando un sistema masa resorte con movimiento libre amortiguado, resuelta analíticamente y simulada con el apoyo del software GeoGebra, en González (2009) se estudian las ecuaciones diferenciales ordinarias lineales de segundo orden de coeficientes constantes que describe este problema con algunas aplicaciones físicas, en Rodríguez (2019). se construye un modelo matemático para explicar o describir la acción de los terremotos sobre edificios de varios pisos, mediante ecuaciones diferenciales de segundo orden de sistema masa resorte.

La motivación de este trabajo es encontrar soluciones numéricas adecuadas para la ecuación diferencial que describe el movimiento armónico amortiguado, implementando algunas funciones ODE de *Matlab*, así como métodos numéricos de diferentes órdenes, que permiten resolver ecuaciones diferenciales ordinarias con condiciones iniciales establecidas.

El objetivo de este artículo es resolver numéricamente la ecuación diferencial del movimiento armónico amortiguado. Se implementarán las funciones ODE23, ODE45 y ODE113 de *Matlab* y algunos métodos numéricos de orden 1, de orden 2, orden 3 y orden 4 con condiciones iniciales a la ecuación diferencial del problema estudiado y posteriormente, se compararán con la solución analítica obtenida para pequeñas intensidades de amortiguamiento.

Según (Sears *et al.*, 2013) y Molina (2016), un sistema amortiguado es un esquema sencillo que se puede observar en la Fig. 1.

Se puede observar un cuerpo de masa m suspendido de un resorte de constante k , que oscila, tiene movimiento armónico amortiguado, cuando la fricción del medio sobre la masa f_r es directamente proporcional a la velocidad, esto es $f_r = -b \frac{dx}{dt}$, siendo b la constante de amortiguamiento y $\frac{dx}{dt}$ es la velocidad de la masa.

Como la masa está sujeta a un resorte, entonces

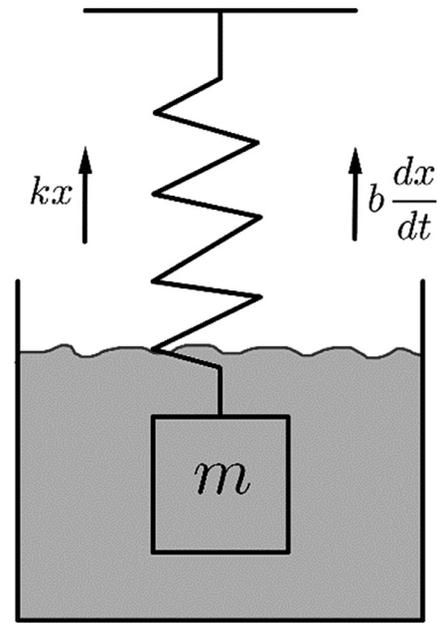


Figura 1. Sistema de movimiento amortiguado.

estará sometida a una fuerza de origen elástica dada por la ecuación $F = -kx$, siendo k la constante elástica del resorte que depende de la geometría y del material del cual está hecho y x es la elongación del resorte a partir de su posición de equilibrio.

El efecto del peso no se considera porque se compensa con la deformación inicial que sufre el resorte al colgarle la masa m y de esta manera, se dice que el sistema está en la posición de equilibrio, se toma como positivo el desplazamiento hacia abajo, por eso los signos de la fuerza elástica y la retardadora se consideran negativos, pues actúan hacia arriba.

Para obtener la ecuación de movimiento se aplica la segunda ley de *Newton* al sistema masa resorte y se obtiene el siguiente resultado:

$$-b \frac{dx}{dt} - kx = ma$$

donde $a = \frac{d^2x}{dt^2}$ es la aceleración de la masa, de esta forma, el movimiento armónico amortiguado de la Fig. 1, quedará descrito por la ecuación di-

ferencial:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$\phi = \arctg \left(\frac{\frac{b}{2m} x_0 + v_0}{w x_0} \right)$$

De esta manera, mediante la aplicación de los métodos usuales de resolución, la solución analítica de la ecuación (1) para pequeñas intensidades de

amortiguamiento $\left(\frac{b}{2m} < \sqrt{\frac{k}{m}}\right)$, está dada por:

$$x(t) = A e^{-\frac{b}{2m}t} \cos(wt + \phi); \text{ con}$$

$$w = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}} \dots\dots\dots(2)$$

En la ecuación (2), las constantes de integración, A , y ϕ (amplitud y desfase) se calculan de mediante las condiciones iniciales:

$$\begin{cases} x(0) = x_0 \\ x'(0) = v_0 \end{cases} \Rightarrow A = x_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\frac{b}{2m} x_0 + v_0}{w x_0}\right)^2};$$

Métodos

Métodos numéricos para ecuaciones diferenciales

En la mayoría de los casos, es muy difícil encontrar soluciones exactas de una ecuación diferencial por medio de métodos usuales, en este contexto, la aplicación de métodos numéricos es indispensable para obtener soluciones aproximadas. Generalmente según (Prima *et al.*, 2000), León (2015) y (Atkinson *et al.*, 2011), los métodos numéricos son utilizados añadiendo condiciones iniciales a la ecuación diferencial a estudiar.

Considere el problema de valor inicial de primer orden:

$$y' = f(x, y); \quad y(x_0) = y_0 \dots\dots\dots(3)$$

Sea $y = \phi(x)$ una solución exacta única de la ecuación (3) en algún intervalo centrado en $x = x_0$, con el supuesto de que f y f_y son continuas en al-

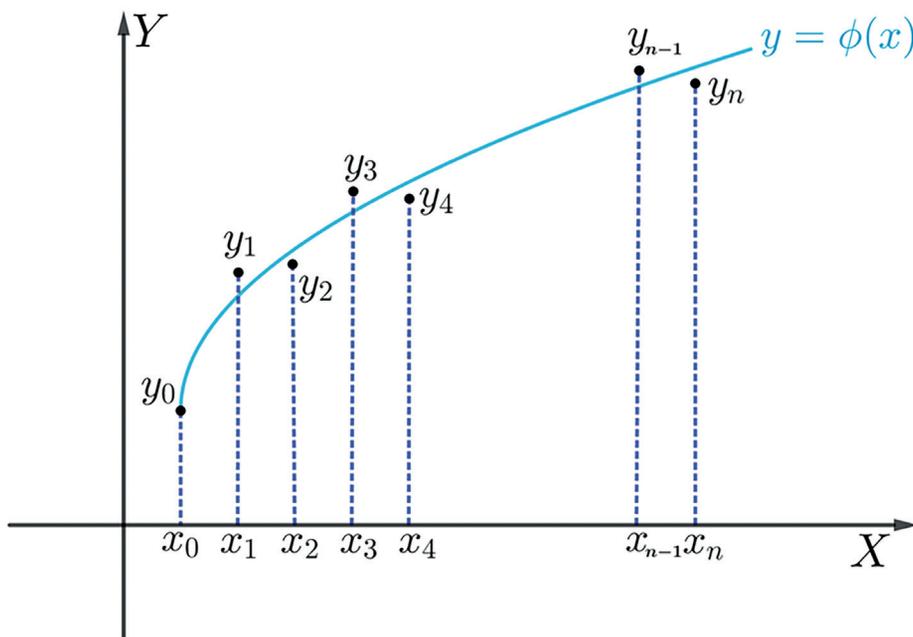


Figura 2. Solución exacta y puntos aproximados.

Resolviendo la ecuación del movimiento armónico amortiguado mediante algunos métodos numéricos

gún rectángulo del plano xy que contenga al punto (x_0, y_0) .

Para encontrar soluciones aproximadas, en métodos numéricos se emplean **algoritmos iterativos de resolución** que calculan los valores aproximados $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n, \dots$ de la solución $y = \phi(x)$ de la ecuación (3) en un conjunto de puntos $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$, como se muestra en la Fig. 2.

En la Fig. 2 se tiene que $y(x_0) = y$ por el problema de valor inicial, pero $\phi(x_n) \neq y_n$ para $n \geq 1$, además, $\phi'(x_0) = f(x_0, y_0) = (y_0)'$ pero $\phi'(x_n) = f(x_n, \phi(x_n)) \neq (y_n)'$ para $n \geq 1$.

También sobre el eje x se realizará un espaciamiento o tamaño de paso uniforme h , así entonces

$$x_1 = x_0 + h; \quad x_2 = x_0 + 2h; \dots; \quad x_n = x_0 + nh.$$

Los métodos numéricos se dividen en dos grupos, **métodos de un paso** donde se utiliza la solución aproximada y_n en x_n para obtener la solución aproximada y_{n+1} en x_{n+1} y en los **métodos multipaso** la solución y_{n+1} se obtiene utilizando el valor o los valores de solución calculados en los puntos anteriores.

El **orden** de un método numérico es un entero no negativo p de modo que $|\phi(x_n) - y_n| \leq c h^p$ para alguna constante c .

En este artículo, se utilizarán métodos numéricos de un paso y multipaso conjuntamente, además se implementarán y se compararán según el orden de los mismos.

Métodos numéricos implementados en la resolución

Los siguientes métodos numéricos implementados en este artículo, resuelven numéricamente el problema de valor inicial (3), en un intervalo cerrado $[a, b]$, donde $x_0 = a, x_{n+1} = b$ y en N pasos. Primeramente se divide el intervalo $[a, b]$ en N partes iguales de longitud $h = \frac{b-a}{N}$ y posteriormente se aplica el algoritmo correspondiente a cada método.

Método de *Euler backward* de orden 1.

Datos: $x_0, y_0, h, f(x, y), N$.

Algoritmo:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + h. \\ y_{n+1} = y_n + hf(x_{n+1}, y_{n+1}). \\ n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1. \end{cases}$$

Método de *Runge Kutta* de orden 2.

Datos: $x_0, y_0, h, f(x, y), N$.

Algoritmo:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + h. \\ y_{n+1} = y_n + hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hf(x_n, y_n)\right). \\ n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1. \end{cases}$$

Método de *Adams Moulton* de orden 3.

Datos: $x_0, x_1, y_0, y_1, h, f(x, y), N$.

Algoritmo:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + h. \\ y_{n+1} = y_n + \frac{1}{12}h(5f(x_{n+1}, y_{n+1}) + 8f(x_n, y_n) - f(x_{n-1}, y_{n-1})). \\ n = 1, 2, 3, \dots, N-1. \end{cases}$$

Método de *Runge Kutta* de orden 4.

Datos: $x_0, y_0, h, f(x, y), N$.

Algoritmo:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + h. \\ y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}h \left[f(x_n, y_n) + 2f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}f(x_n, y_n)\right) + \frac{1}{6}h \left[2f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}f(x_n, y_n)\right)\right) + \frac{1}{6}h \left[f\left(x_n + h, y_n + hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}f(x_n, y_n)\right)\right)\right) \right] \right] \\ n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1. \end{cases}$$

Las funciones ODE de *Matlab*.

Las funciones ODE de *Matlab* proporcionan una solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias con problemas de valores iniciales, cuando es difícil encontrar la solución analítica de la men-

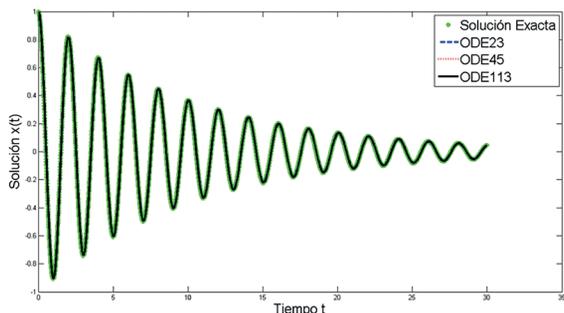


Figura 3. Soluciones numéricas para $x(t)$ en el intervalo $[0,30]$, con $h = 0.0075$, $N = 400$, $m = 1$, $b = 0.2$ y $k = 9.81$.

cionada ecuación diferencial. Se implementaron debido a la ineficiencia del método de *Euler* en las aplicaciones. [9]

En este trabajo se implementarán las funciones ODE23, ODE45 y ODE113 para resolver la ecuación (1) con algunas condiciones iniciales establecidas.

El uso de las funciones ODE en código de *Matlab* se describe a continuación.

$$[T, Y] = ODE(odefun, tspan, Y_0)$$

odefun es un identificador de función, que puede ser un nombre de archivo de función, un identificador de función anónimo o un nombre de función en línea.

tspan es el intervalo $[x_0, x_{n+1}]$ o una serie de puntos dispersos $[x_0, x_1, \dots, x_{n+1}]$.

Y_0 es el vector de valor inicial.

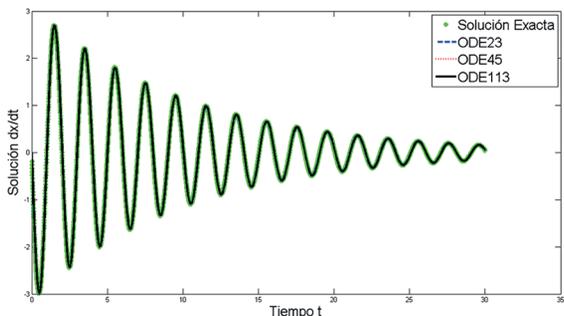


Figura 4. Soluciones numéricas para $\frac{dx}{dt}$ en el intervalo $[0,30]$, con $h = 0.0075$, $N = 400$, $m = 1$, $b = 0.2$ y $k = 9.81$.

T devuelve el tiempo del vector de columna.

Y devuelve el vector de la columna de solución correspondiente a T .

Resultados y discusión

Para la implementación de los algoritmos mencionados anteriormente, se consideraron la ecuación

$$diferencial \quad m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

que describe el movimiento armónico amortiguado, donde $\frac{dx}{dt}$ representa la velocidad del movimiento vertical de la masa, con las siguientes condiciones iniciales, $x(0) = 1$ y $x'(0) = 0$.

Se presentarán a continuación, los resultados obtenidos para la solución analítica $x(t)$ y para la velocidad del movimiento vertical de la masa $\frac{dx}{dt}$.

A) Resultados de la implementación de las funciones ODE de Matlab.

En la Fig. 3 se muestra la comparación de las funciones ODE23, ODE45 y ODE113 con la solución exacta $x(t)$, mediante una experimentación numérica en el intervalo $[0,30]$.

En la Fig. 4 se muestra la comparación de las funciones ODE23, ODE45 y ODE113 con la velocidad del movimiento vertical de la masa $\frac{dx}{dt}$, mediante una la experimentación numérica en el intervalo $[0,30]$.

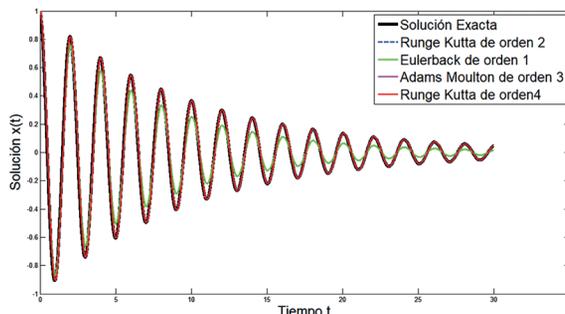


Figura 5. Soluciones numéricas para $x(t)$ en el intervalo $[0,30]$, con $h = 0.0075$, $N = 400$, $m = 1$, $b = 0.2$ y $k = 9.81$.

B) *Resultados de la implementación de los métodos numéricos de orden 1, de orden 2, de orden 3 y de orden 4 descritos en este trabajo.*

En la Fig. 5 se muestra la comparación de las soluciones numéricas de los métodos eulerbackward de orden 1, Runge Kutta de orden 2, Adams Moulton de orden 3 y Runge Kutta de orden 4 con la solución exacta $x(t)$, mediante una la experimentación numérica en el intervalo $[0,30]$.

En la Fig. 6 se muestra la comparación de las soluciones numéricas de los métodos *Euler backward* de orden 1, *Runge Kutta* de orden 2, *Adams Moulton* de orden 3 y *Runge Kutta* de orden 4 con la velocidad del movimiento vertical de la masa $\frac{dx}{dt}$, mediante una la experimentación numérica en el intervalo $[0,30]$.

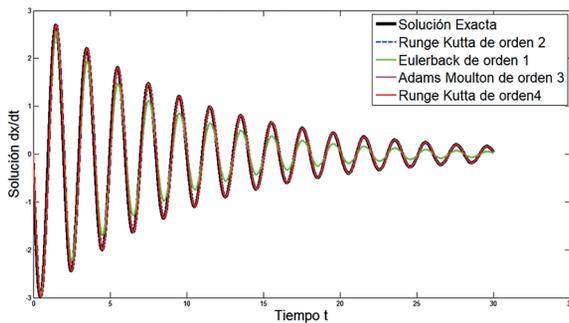


Figura 6. Soluciones numéricas para $\frac{dx}{dt}$ en el intervalo $[0,30]$, con $h = 0.0075$, $N = 400$, $m = 1$, $b = 0.2$ y $k = 9.81$.

Conclusiones

En este trabajo se han realizado soluciones numéricas para pequeñas intensidades de amortiguamiento del problema que describe el movimiento armónico amortiguado representado mediante ecuaciones diferenciales, la cual presenta solución analítica real para la condición dada, posteriormente, se han implementados algunos métodos numéricos, así como las funciones ODE23, ODE45 y ODE113 de *Matlab*, para realizar una comparación con la

solución analítica exacta del modelo estudiado y con la velocidad del movimiento vertical de la masa.

A continuación, se presentan las conclusiones sobre la comparación de las distintas funciones ODE de *Matlab* con las soluciones exacta y de velocidad vertical.

- Las funciones ODE23, ODE45 y ODE113 incorporadas en *Matlab* permiten resolver de manera eficiente ecuaciones diferenciales ordinarias con problema de valor inicial, sobre la implementación de estas funciones al modelo estudiado se puede concluir que, la función ODE113 presenta más aproximación a las soluciones analíticas exacta y de velocidad vertical, debido a su número de orden.
- En general, no hay mucha diferencia entre las funciones ODE de *Matlab* y se pueden ser consideradas como las soluciones numéricas más exactas para ecuaciones diferenciales ordinarias con problema de valor inicial.

Con relación a los métodos numéricos aplicados, el método de **orden 1 Eulerback**, es el que presenta menor aproximación a las soluciones analíticas exactas y de velocidad vertical, el resultado del método numérico de **orden 2, Runge Kutta**, presenta una notable mejoría respecto al resultado del método de orden 1. Sin embargo, los métodos de **orden 3** y de **orden 4** son los que se aproximan de manera eficiente a las soluciones analíticas exactas y de velocidad vertical, siendo el método *Runge Kutta* de orden 4 la mejor.

Para la resolución numérica de este tipo de problema de valor inicial se recomienda la implementación de cualesquiera de las funciones ODE de *Matlab* y de los métodos numéricos, el método de *Runge Kutta* de orden 4 es el indicado.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Literatura citada

- Atkinson, K., Han, W. & Stewart, D. E. (2011). *Numerical solution of ordinary differential equations*. Hoboken: John Wiley & Sons. xii + 252.
- Di Prima, B. & Boyce, W. (2000). *Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera*. México, D.F.: Limusa / Grupo Noriega Editores. 758 pp.
- González, H. (2009). *Ecuaciones diferenciales ordinarias lineales de segundo orden de coeficientes constantes y algunas aplicaciones físicas*. Repositorio Institucional, Universidad de Carabobo. [Consulted: 18.vi.2022]. <<http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/756>>.
- León Camejo, P.D. (2015). *Métodos numéricos para ecuaciones diferenciales ordinarias: métodos Runge-Kutta explícitos*. Trabajo de Grado. San Cristóbal de La Laguna: Universidad de La Laguna. 43 pp.
- Molina M.C. (2016). *Métodos Matemáticos de la Física II: Ecuaciones Diferenciales y Funciones Especiales*. Texto de Curso. Granada: Universidad de Granada. 152 pp.
- Costa, V.A., Bordogna, C.M. & Torroba, P.L. (2011). *El movimiento armónico simple y las ecuaciones diferenciales de segundo orden lineal: su articulación en la enseñanza*. Exposición. I Jornada de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. 8 pp.
- Pascual, F.E.B., Mariño, M.L. & Sada, A.E.G. (2008). *Análisis del Movimiento Oscilatorio*. Reporte Técnico. Veracruz: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. 16 pp.
- Rodríguez Chuquimango, S.P. (2019). *Modelamiento matemático de la acción de los terremotos sobre edificios de varios pisos usando sistemas de ecuaciones diferenciales de segundo orden*. Informe Final de Proyecto de Investigación. Callao: Universidad Nacional del Callao. 79 pp.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D. & Freedman, R. A. (2013). *Física Universitaria: Volumen 1*. (13ª Ed.). Naucalpan de Juárez: Pearson Educación de México. xxvii + 686 + 25 pp.
- Serrano, M.D.C.C., Oliver, E.B.V., Resendiz, S.M. & Galván, W.G.A. (2016). Sistema masa resorte con movimiento libre amortiguado, casos: sobreamortiguado, críticamente amortiguado y subamortiguado, su modelado y solución, con el apoyo de GeoGebra. *Pistas Educativas*, 38(121): 61–80.

Sonidos sísmicos en Paraguay

Earthquake sounds in Paraguay

Alcides Caballero^{1,*}, Moisés Gadea¹, Rafael Fugarazzo¹ & Vincent Figueres¹

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Geología, Laboratorio de Sismología.

*Autor correspondiente: acaballero@facen.una.py.

Resumen: Por medio de datos macrosísmicos y de sismicidad histórica, se reporta la ocurrencia de sonidos sísmicos en Paraguay. Estos registros audibles precedieron o acompañaron a los sismos locales según testimonios de pobladores cercanos a los lugares epicentrales.

Palabras Clave: Sonidos sísmicos, sismos, epicentros, Paraguay.

Abstract: By means of macroseismic data and historical seismicity, the presence of earthquake sounds in Paraguay is reported. These audible record preceded or went with local earthquakes according to settlers nearby epicentral places.

Key Words: Earthquake sounds, earthquakes, epicenters, Paraguay.

Introducción

Paraguay se encuentra en el centro de la Placa Sudamericana, alejado de los márgenes activos en donde con frecuencia ocurren terremotos que inciden perjudicialmente en la civilización. No obstante, en Paraguay se perciben sacudidas del tipo intraplaca (Fugarazzo et al., 2021), con la suficiente energía para generar susto o temor en la población sin causar daños considerables.

Por estas características a Paraguay se lo considera como un país penisísmico, atributo que señala una zona con sismos leves a moderados (Meléndez & Fuster, 2000). Algunos de estos sismos, según reportes, ocurren acompañados por registros audibles al ser humano y que se denominan sonidos sísmicos, tronares sísmicos, o *earthquake booms*. Dicho efecto sónico se asocia a casi todos los terremotos y ha sido reportado desde crónicas antiguas (Tosi et al., 2012).

Los sonidos sísmicos se describen en general, como parecidos a estampidos, ventarrones, disparos, tráfico pesado distante, truenos o explosiones audibles en el área de epicentros (o a kilómetros) de eventos pequeños a fuertes. Estos sonidos usualmente se perciben antecediendo a un sismo o durante su misma sacudida (Tosi et al., 2000).

Los sonidos se producen por transferencia de

energía elástica del subsuelo hacia la atmósfera. Es casi seguro que el sonido es producido por el grupo de ondas longitudinales del tipo P, mientras que la sacudida ocurre durante el arribo de las ondas transversales S de mayores amplitudes (Richter, 1958).

Ondas acústicas audibles (sonidos sísmicos) se generan por las ondas de cuerpo P y SV de sismos cercanos que se acoplan al aire exterior por medio del movimiento del terreno en superficie (Hill, 1976). Cuando existe una oscilación por excitación sísmica, cada punto del terreno actúa como un amplificador. La intensidad acústica resultante es proporcional a la velocidad de vibración de la partícula causada por la onda sísmica incidente (Tosi et al., 2000).

Según Sylvander et al. (2007. En Tosi et al., 2012), los registros de sonidos acompañando pequeños sismos indican frecuencias dominantes en el rango de 5 Hz a 60 Hz (Fig. 1).

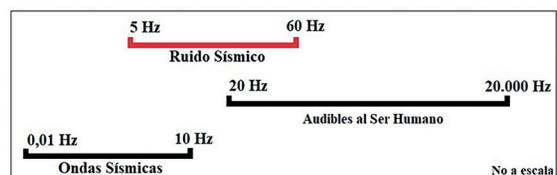


Figura 1. Rangos de frecuencias involucrados en un sismo con sonido.

Recibido: 14/06/2022

Aceptado: 14/04/2023



El comportamiento acústico está controlado por los mecanismos focales y profundidades de los sismos en una misma región, en donde su radiación es isotrópica cuando el mecanismo focal del evento señala un fracturamiento de desplazamiento vertical, y anisotrópica cuando es del tipo transcurrente (Tosi *et al.*, 2000). Si la energía del sismo es lo suficientemente grande, los sonidos pueden viajar por centenas de millas (Richter, 1958).

Los reportes de sonidos audibles relacionados con los sismos son comunes, sin embargo los registros instrumentales son escasos. La mayoría de la documentación descansa casi enteramente en testimonios posteriores a los eventos (Hill, 1976). El estudio macrosísmico es fundamental en este tipo de investigaciones. Macrosísmica se refiere a los efectos visibles o perceptibles por observadores de algún evento telúrico.

Según Richter (1958), los sonidos audibles son uno de los efectos macrosísmicos principales de los sismos tectónicos. Estos efectos pueden ser primarios, cuando ocurren fracturamientos o eventos volcánicos modificando el entorno fisiográfico; y secundarios, a los efectos del momento debido a la agitación del terreno por el paso de ondas elásticas como consecuencia de los efectos primarios. A los sonidos sísmicos se los agrupa dentro de los secundarios y transitorios, porque sólo se los percibe antes o durante las sacudidas.

Resultados

Recolección de datos macrosísmicos

En el país existen reportes de fenómenos sonoros al momento de percibir un temblor, así como lo había mencionado Harrington (1950), *“En la noche del 24 de diciembre de 1944, un sismo bastante notable se sintió todo a lo largo de la depresión de Ypacaraí, desde San Bernardino a Paraguarí. El sacudimiento fue bastante como para que muchas personas se alarmaran y abandonaran sus casas, y se oyeron, al mismo tiempo, fuertes ruidos parecidos a truenos lejanos. Este hecho prueba que el sismo fue realmente local, pues de otro modo no se hubieran escuchado brontides, lo que a su vez indica que las fallas principales están aún activas*

en la zona”.

El 1 de marzo del 2005, en la zona de San Miguel (departamento de Misiones), el sismo de magnitud 3.5 ML (estimado) se manifestó acompañado de un fuerte sonido muy particular, comparado al tráfico de automotores pesados en subsuperficie. Eso alertó a los pobladores de la zona, quienes contactaron con operadores de la estación de sismología en San Lorenzo para informar acerca de lo acontecido.

El 21 de junio de 2009 ocurrió un sismo de magnitud 2.8 ML en la ciudad de Pilar, del departamento de Ñeembucú, y los habitantes percibieron el temblor y añadieron al relato: “Escuchamos una fuerte explosión, parecía un cañonazo” (Última Hora, 2009).

El sismo de magnitud 3.8 mbR (onda de cuerpo regional. SISBRA) producido el día miércoles 17 de junio de 2015 al norte del departamento de Caazapá, y fuertemente sentido en la ciudad de Villarrica. A la par de apreciar el temblor, los pobladores de la zona percibieron un estruendo característico. (ABC Colo, 2015).

Otro evento similar se dio el 15 de octubre de 2017, un sismo de magnitud 3.0 mbR en la zona de General Díaz en el departamento de Ñeembucú. Los habitantes percibieron el “tronar”. Algunos describieron como un gran trueno parecido al inicio de una tormenta, mientras que otros hacían alusión al sonido semejante al paso de un camión. (ABC Color, 2017“Ult).

El 26 de diciembre de 2020 ocurrió un evento de magnitud 3.3 mR, cuyo epicentro fue localizado en la zona de San Patricio – Misiones. Un muestreo macrosísmico reveló que varias personas en las localidades de San Ignacio y Santa Rosa han percibido sonidos sísmicos al tiempo de la sacudida. Estos sonidos fueron comparados con el tronar característico de descargas eléctricas/relámpagos.

En el bajo Chaco paraguayo ocurrió un evento sísmico que fue sentido en toda el área metropolitana de Asunción y en municipios aledaños. Fue en la fecha del 30 de marzo 2022, de magnitud 3.9 ML. Varios pobladores de diferentes ciudades en el departamento Central reportaron un sonido durante ese evento.

#	Año	Fecha	Hora	Lat.	Long.	Err. (Km)	Mag.	Pf. (Km.)	Región/Zona	Dpto.	Fuente
1	1944	24-dic	-	-	-	-	-	-	S. Bern./Paraguari	Cent./Parag.	Harrington, 1950.
2	2005	01-mar	16:11:31	-26.57°	-57.13°	50	3.5 MI	0	San Miguel	Misiones	CPUP, IAG, IPT
3	2009	21-jun	23:11:00	-27.10°	-58.08°	20	2.8 MI	0	Desmochados	Ñeembucú	CPUP
4	2015	17-jun	16:44:07	-25.98°	-56.28°	10	3.2 mbR	0	SE Ñumí	Caazapá	CPUP, IAG.
5	2017	15-oct	06:00:00	-27.09°	-58.26°	20	3.0 MI	15	General Díaz	Ñeembucú	CPUP, IAG.
6	2020	26-dic	20:57:06	-25.98°	-56.78°	-	3.1 MI	0	San Patricio	Misiones	CPUP, IAG
7	2022	30-mar	20:57:06	-24.75°	-58.30°	-	3.9 MI	10	Benjamín Aceval	P. Hayes	CPUP, USGS
8	2022	28-sep	17:15:37	-25.81°	-56.99°	-	3.2 MI	0	La Colmena	Paraguari	CPUP, IAG

Tabla 1. Lista de eventos con ruidos sísmicos en el Paraguay.

El sismo reportado en Paraguay el 28 de septiembre 2022, cuyo epicentro fue localizado en las cercanías de La Colmena y de magnitud 3.2 MI, pobladores de la ciudad de Carapegua describieron el efecto como un *gran ruido*, o *trueno*, y luego la sacudida.

Discusión y conclusiones

Se comprueba por reportes, la existencia de hechos naturales del tipo sonidos sísmicos en Paraguay. Se han reportado siete de ellos, y probablemente hayan ocurrido en otras ocasiones en lugares distantes y/o sin poblados que hayan alcanzado a percibirlos.

De los ocho eventos mencionados (Tabla 1), información de uno de ellos fue obtenido de una publicación antigua. Los demás fueron percibidos por observadores cercanos a los epicentros de los eventos y que reportaron a la prensa. Para el sismo del 26 de diciembre del 2020, fue realizado un muestreo macrosísmico, en el cual se ha comprobado que varias personas percibieron el sonido sísmico en varias localidades cercanas al epicentro

del sismo.

Estos sonidos fueron reportados durante sismos locales y conciden con las descripciones sonoras realizadas en otros lugares, tales como: estruendos, tráfico de vehículos pesados, explosiones, etc.

Según el mapa sismológico del Paraguay (Fig. 2), estos eventos fueron identificados en localidades que pertenecen a la cuenca del Paraná, que casi coincide enteramente en geografía con la Región Oriental del país; y uno de ellos en su zona cratónica. No se descarta que también puedan ocurrir y ser observados en el sector chaqueño.

Siendo que Paraguay presenta una sismicidad característica, con sus eventos locales del tipo intraplaca recurrentes, se estima que los sonidos concomitantes serán percibidos con los futuros eventos.

Por medio de relevamientos macrosísmicos se reportará la existencia o no de los sonidos sísmicos durante cada evento sísmico. De los sonidos sísmicos de eventos antiguos se podría conocer por revisión de sismicidad histórica en textos de carácter histórico o de documentación antigua.

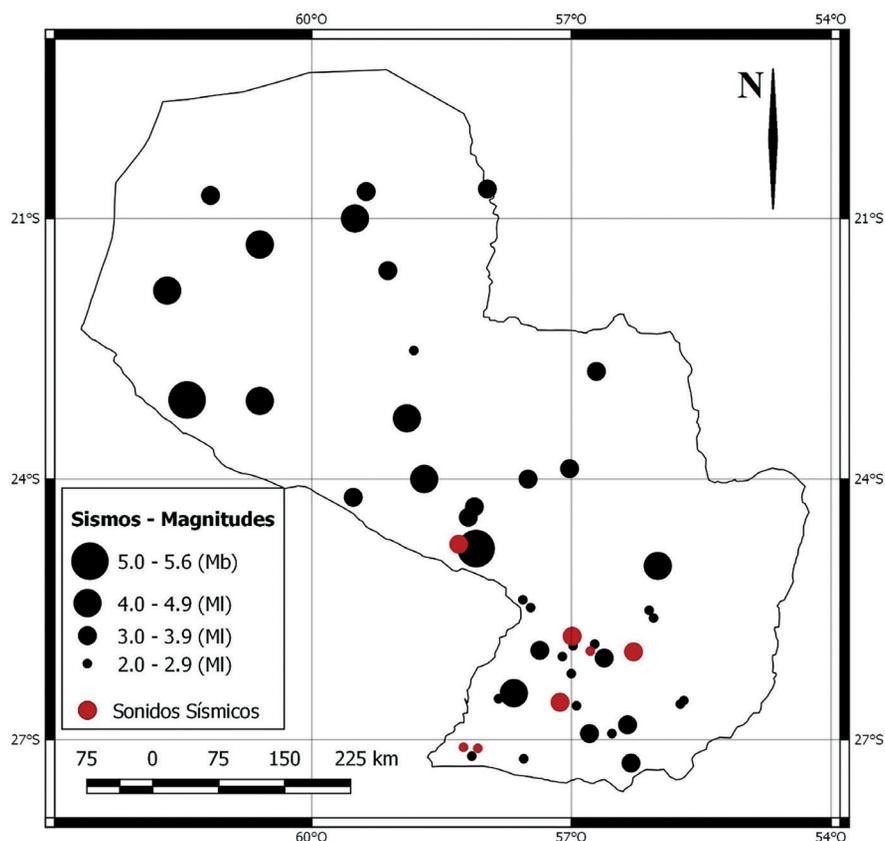


Figura 2. Mapa sismológico del Paraguay y eventos con sonidos sísmicos reportados.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa en la elaboración de este artículo.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Agradecimiento

A Patrizia Tosi, del Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología de Roma, por la revisión del presente trabajo.

Literatura citada

ABC Color. (2015) [17.vi.2015]. Breve temblor en Guairá. *ABC Color*. [Consulted: 29.x.2021] <<http://www.abc.com.py/nacionales/breve-temblor-en-guaira-1378236.html>>.

ABC Color. (2017) [16.x.2017]. Temblor fue

autóctono, según expertos. *ABC Color*. [Consulted: 29.x.2021]. <<http://www.abc.com.py/nacionales/temblor-fue-autoctono-segun-expertos-1641127.html>>.

Fugarazzo, R., Gadea, M., Caballero, M., Assumpção, M.S. & Figueres, V. (2021). Las Zonas sísmicas en Paraguay. *Reportes Científicos de la FaCEN*, 12(1): 10–20.

Harrington, H.J. (1950). *Geología del Paraguay Oriental*. Buenos Aires: FACENA-UBA. 82 pp. + 3 pls. + 2 maps.

Hill, D.P., Fisher, F.G., Lhar, K.M, Coakley, J.M. (1976). Earthquake sounds generated by bodywave ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(4): 1159–1172.

Meléndez, B. & Fuster, J.M. (2000). *Geología*. Madrid: Ediciones Paraninfo. 912 pp.

Richter C.F. (1958). *Elementary Seismology*. San

- Francisco/London: W.H. Freeman and Company. 768 pp.
- Tosi, P., De Rubeis, V., Tertulliani A. & Gasparini, C. (2000). Spatial patterns of earthquake sounds and seismic source geometry. *Geophysical Research Letters*, 27(17): 2749–2752.
- Tosi, P., Sbarra, P. & De Rubeis, V. (2012). Earthquake sound perception. *Geophysical Research Letters*, 27(17)L24301: 1–5.
- Última Hora. (2009) [22.vi.2009]. El fuerte temblor en Pilar en la noche del domingo solo dejó susto. *Última Hora*. [Consulted: 29.x.2021]. <<http://www.ultimahora.com/el-fuerte-temblor-pilar-la-noche-del-domingo-solo-dejo-susto-n232030.html>>.

GUÍA PARA LOS AUTORES

Reportes Científicos de la FACEN, es una revista de acceso libre y gratuito y es la publicación científica oficial de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción. Es emitida semestralmente y publica **Artículos originales, Artículos de revisión, Tópicos actuales, Reportes de casos, Comunicaciones cortas y Correspondencia**, en las áreas de Biología, Química, Física, Matemática Pura, Matemática Estadística, Geología, Biotecnología y Tecnología de Producción. Los principales criterios para la selección de los artículos son la solidez científica y la originalidad del tema. Los trabajos y opiniones publicados en la revista son de exclusiva responsabilidad de los autores. El idioma oficial de la revista es el español, pero se aceptan trabajos en inglés y en portugués. No existe costo de publicación para los autores.

El trabajo será enviado en formato electrónico a la dirección email de la revista (reportescientificos@gmail.com), consistiendo en archivos de texto, archivos de planilla electrónica y archivos de imagen. **El archivo principal de texto debe contener únicamente texto, sin ilustraciones ni tablas embebidas**, sino únicamente las respectivas citas a las mismas en el texto (numeradas secuencialmente). **Las tablas e ilustraciones deberán ser remitidos en formato digital en archivos independientes**. Los respectivos archivos deberán indicar en su nombre a qué número de tabla o ilustración corresponden.

El archivo de texto debe ser producido con Microsoft Word® u otro editor de texto perfectamente compatible. El texto deberá estar en letra Times New Roman, tamaño 11. Todo trabajo llevará en su primera página los siguientes elementos: **a) el Título** en español e inglés, **b) la lista de Autores** con nombre y apellido, **c) la Afiliación** laboral de cada autor, **d) un Resumen** de un máximo de 250 palabras en español, **e) un máximo de 7 Palabras clave** en español, **f) un Abstract** en inglés, correspondiente a la versión en español y **g) un máximo de 7 Key words** en inglés, correspondientes a la versión en español. **En caso de trabajos en Portugués** se añaden Título, Resumo y Palavras chave en dicho idioma. El resumen sólo podrá obviarse en el caso de Editoriales, Comunicaciones cortas y Correspondencias presentadas como tales. El cuerpo principal del texto podrá contener, según el contexto del trabajo, las secciones de **1) Introducción, 2) Materiales y métodos (o sólo uno de ellos de acuerdo al caso), 3) Resultados, 4) Discusión, 5) Conclusión, 6) Agradecimientos y 7) Literatura citada**. Tales secciones podrán sufrir fusión o no existir, de acuerdo a la metodología de trabajo o enfoque dados por el autor, así como al tipo de escrito (Artículo original, Comunicación corta, etc.) como haya sido presentado por autor o como lo decida el comité editorial. **Los pies de figuras y tablas** deberán ir al final del texto, a continuación de la sección de literatura citada.

Las citas bibliográficas deberán seguir las normas APA. Según estas normas, el año va entre paréntesis y se destacan el autor y año en las citas en texto: “Según González (1999)” o “El método es reciente (González, 1999)”. Para la lista en la sección de Literatura citada la secuencia lógica y formato es de “Autor. (Año). Título. Publicador, Volumen(Número): Páginas.”, poniéndose siempre primero el apellido de cada autor, seguido de sus correspondientes iniciales y separados por comas, con el último autor separado por un signo de ampersand. Se aplicará cursivas respectivamente en el título si se trata de un libro o tesis, o en el publicador si se trata de un artículo. Se ilustra en los siguientes ejemplos:

González, A.P. (1999). *Métodos de análisis crítico*. Asunción: Editorial Nueva. 120 pp.

González, A.P., Martínez, G.T. & Robledo, H.A. (1999). Análisis de la producción científica del país. *Revista de Filosofía Científica*, 45(2): 56-61.

Las tablas y cuadros deberán presentarse en archivos de Microsoft Excell® u otro programa perfectamente compatible, aunque en muchos casos se aceptan también tablas embebidas en archivo de Microsoft Word®, siempre que sea en archivo separado del de texto. **Las ilustraciones (graficos, imágenes, fotos, dibujos, mapas, esquemas o láminas completas) deberán presentarse cada una en un archivo aparte**, en formato JPG o TIF, generados en Adobe Photoshop u otro programa de procesamiento de imágenes. Deberá cuidarse que posean buen enfoque, claridad y contraste, que tengan una resolución mínima de 300 dpi y máxima de 1000 dpi y teniendo en cuenta que su anchura máxima en la revista será de 16 cm.

El proceso de evaluación incluye una primera revisión por el Comité Editorial para determinar si el artículo corresponde a la línea editorial y si cumple con los criterios generales de publicación. Una vez que el artículo se considere pertinente, se someterá a por lo menos dos revisores especialistas en el tema, de cuya opinión depende la aceptación definitiva del artículo. Si existiera una contradicción en la opinión de ambos especialistas, se someterá al Comité editorial o en caso contrario se solicitará una tercera opinión de un tercer especialista. El dictamen podrá ser aceptado, rechazado o condicionado, que será comunicado por escrito al autor principal en un plazo no mayor de tres meses de la recepción del material original. Si el dictamen es condicionado, el autor deberá remitir la nueva versión impresa y en formato digital en el plazo que se le indique que no podrá exceder de los 30 días posteriores a la recepción de la comunicación.

REPORTES CIENTÍFICOS

D E L A F A C E N

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol. 14, Nº 1	Enero - Junio de 2023	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	------------------	--------------------------	---

ARTÍCULOS ORIGINALES

- 3–10 **Stella Guefos de Fuster & Marlene Román de Del Puerto.** Proyecto experimental de seguimiento de estudiantes de las distintas ofertas académicas de grado de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN), de la Universidad Nacional de Asunción (UNA), San Lorenzo.
- 11–24 **Francisco P. Ferreira B., Mauro Vicentini, Juliana Moura, Alfredo Acosta & Miguel Martínez.** Estudio químico-biológico del extracto crudo etanólico de hojas del *Schinus molle* Mart. Ex Engl (Molle'i) de la localidad de Pirareta (Cordillera, Paraguay).
- 25–34 **Edgar A. Sánchez Báez, José M. Román, María Paz Brassel & Diego Sebastián Parra.** Impacto del COVID-19 en las MIPYMES paraguayas: una perspectiva desde el tamaño, sector económico y antigüedad de la empresa.
- 35–49 **Patricia Salinas, Alberto Esquivel & Juan Emanuel Pech.** Riqueza de aves en el Área de Reserva para Parque Nacional San Rafael y su zona de amortiguamiento-Paraguay.
- 50–61 **Julio César Benítez-Villalba, Martiniano Barrios & Mercedes Benítez-Peña.** Validación de una metodología analítica para la cuantificación de la ciprofloxacina en huevos de gallinas mediante HPLC.
- 62–69 **Federico Fernández.** IoT aplicado al monitoreo en tiempo real de cultivos agrícolas.
- 70–77 **Elsa Cárdenas, Zunilda Allende, María Ferreira, Alan Velázquez & Christian Vogt.** Estudio de la capacidad depuradora de *Pistia stratiotes* L. en el tratamiento de aguas residuales generados en el Laboratorio de Efluentes de FACEN-UNA.
- 78–90 **Rubén Fernández & Gustavo Mereles Menesse.** Análisis de la distribución espacial de parches de vegetación en Médanos del Chaco: Posibles indicios de un cambio de régimen catastrófico.
- 91–97 **Salustiano Vega, Jorge Jara, Osvaldo Vega, Gustavo González & Crispín Vargas.** Resolviendo la ecuación del movimiento armónico amortiguado mediante algunos métodos numéricos.
- 98–102 **Alcides Caballero, Moisés Gadea, Rafael Fugarazzo & Vincent Figueres.** Sonidos sísmicos en Paraguay.

