

MUTIS



Cattleya trianae
Chlorostilbon mellisugu
Flor de Mayo | Colibri esmeralda
Benjamín Cárdenas Valderrama

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Jefatura de Publicaciones
Carrera 4 n.º 23-76, Módulo 29, of. 203
Piso 2, Bogotá, D. C., Colombia
Tel: (571) 242 7030, Exts. 3120-3132

Rector
CARLOS SÁNCHEZ GAITÁN

Vicerrector Académico
ANDRÉS FRANCO HERRERA

Vicerrectora Administrativa
LILIANA ÁLVAREZ REVELO

Director de Investigación, Creación y Extensión
LEONARDO PINEDA SERNA

Decano de la Facultad de Ciencias Naturales
e Ingeniería
ISAAC DYNER REZONZEW

Jefe de Publicaciones
MARCO GIRALDO BARRETO

Coordinador Editorial
JUAN CARLOS GARCÍA SAENZ

Coordinación gráfica y diseño y diagramación
LUIS CARLOS CELIS CALDERÓN

Corrector de estilo
LEONARDO PAIPILLA PARDO

Coordinación editorial y revisión
MARY LIDIA MOLINA BERNAL

Distribución y ventas
SANDRA GUZMÁN

Asistente administrativa
MARÍA TERESA MURCIA

Mutis es una publicación electrónica semestral de ciencia e investigación editada por la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Los artículos publicados son responsabilidad de sus autores y no comprometen la posición editorial de *Mutis*.

Editor
GERARD OLIVAR TOST

Editor de sección
JAVIER HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

Comité Editorial
ISAAC DYNER REZONZEW
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
MICHAEL J. AHRENS
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
LEONARDO MARIÑO RAMÍREZ
NCBI - National Center for Biotechnology Information,
Bethesda MD, EE. UU.
MYRON SPECTOR
Harvard University, EE. UU.

Comité Científico
MÓNICA PUYANA HEGEDUS
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
ANDRÉS FELIPE SUÁREZ ESCOBAR
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia
ALBA GRACIELA ÁVILA
Universidad de los Andes, Colombia
ANDRÉS FELIPE LÓPEZ
Universidad de La Sabana, Colombia
SILVIO ALEJANDRO LÓPEZ PASOS
Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca,
Colombia



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works

Actualmente el contenido está indexado e incluido en Google Scholar, Academia.edu, BASE, Directory of Research Journals Indexing, Latindex, MIAR, Mendeley, PERIODICA, PKP index, ROAD, Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ, Ebsco (fuente académica), Redib

CONTENIDO

Vol. 10 n.º 1 – I. Edición 2020

EDITORIAL

The Vaccine Against COVID-19: A Race Against Time

Javier Hernández Fernández

5

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN – RESEARCH ARTICLES

Diseño de una columna empacada y una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol. 2. Diseño de la torre de bandejas perforadas

Design of a Packed-Bed Column and a Sieve Tray Tower for Ethanol Absorption. 2. Sieve Tray Tower Design

Amaury Pérez Sánchez, Eddy Javier Pérez Sánchez, Mahel Gabriel Bodaño Hernández

8

Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia

Comparative Analysis of Impacts on Water Resources Generated by Major Landfills in Colombia

Diana Lucía Cristancho Montenegro, Angie Stefany Torres Mejía, Johan Fernando Lobatón Orduz

25

Evaluación de la influencia de la agitación para la producción de biomasa microalgal en un fotobiorreactor panel plano a escala laboratorio

Evaluation of the Influence of Agitation for the Production of Microalgal Biomass in a Flat Panel Photobioreactor at Laboratory Scale

Jennifer L. Doncel Núñez, Heidy L. Moreno Saboyá

46

Listado de plantas ornamentales urbanas de Tunja (Boyacá, Colombia)

A List of Urban Ornamental Plants in Tunja (Boyacá, Colombia)

Wilson Ricardo Álvaro Alba, Mónica Patricia Díaz Pita

57

Análisis de viabilidad y diseño para el abastecimiento de agua potable en la vereda Socota del municipio de Apulo (Cundinamarca, Colombia)

Feasibility Analysis and Design of a Drinking Water Supply System in the Village of Socotá, Municipality of Apulo (Cundinamarca, Colombia)

Andrea Tatiana Jaime Bello, Jenny Alejandra Martínez Jiménez, Jesús Ernesto Torres Quintero

79

Instrucciones para autores

98

Errata Mutis 9(1)

Por solicitud de los autores se cambia la ecuación de la página 63, de la edición de Mutis 9(1), así:

Sustituir la ecuación de la pagina 63

$$C_{col(2018)}^h = 2.165 \cdot \frac{605,2}{239,0}$$

$$C_{col(2018)}^h = USD \$ 5.482 / m$$

Por la siguiente:

$$C_{col(2018)} = C_{col(2018)}^h \cdot h_{T(col)} = USD \$ 5.482 / m \cdot 4 m$$

$$C_{col(2018)} = USD \$ 21.928 \approx USD \$ 22.000$$

[5]

EDITORIAL

Vol. 10 (1) pp. 5-7, enero-junio del 2020

The Vaccine Against COVID-19: A Race Against Time

More than 16,5 million people have been infected with COVID-19 worldwide, resulting in 655,300 deaths and immeasurable economic disruption. After the initial outbreak and more than 220,000 cases and 7,000 deaths in Colombia, COVID-19 has widespread across 188 countries. The infection progresses daily, and cases and deaths increase mainly in the United States, Brazil, Russia, India, and South American countries such as Peru, Mexico, Chile, and Colombia.

This pandemic has challenged both policymakers and scientists around the world and created the need to provide effective solutions to reduce the spread of the disease. However, we still do not have a successful treatment, let alone a vaccine that neutralizes the rapid escalation of the pandemic. Science is advancing rapidly. There are hundreds, even thousands, of studies that explain the disease and its infection patterns. In Colombia, the sequencing of more than 100 virus genomes has already been carried out, an achievement never accomplished before in our country. According to the studies of strains currently circulating in the country, about 80% of infections are caused by a strain coming from Spain.

Currently, around 250 vaccines against COVID-19 are being developed. Among these, there are varied and revolutionary methods such as mRNA vaccines, replicating or non-replicating viral vaccines, DNA vaccines, autologous dendritic cell-based vaccines, and inactive virus vaccines. Today, 17 of these vaccines are under evaluation in clinical trials.

Long gone are traditional vaccines based on agonizing viruses that awaken the immune response of our cells. We are in a time of almost implausible initiatives and enormous human inventiveness. Science works at an unbeatable speed to get a vaccine. This accelerated pace was believed impossible to achieve and current altruism and collaboration between international research groups are unprecedented.

Developing a vaccine against a coronavirus could take around 10 years, but science is creating new expectations, resulting in optimists believing that it could arrive as early as late 2020. Others (no less optimistic) think that we could have a vaccine by mid-2021. It seems feasible, but not an easy task. The race against the coronavirus is in a stage of high expectation and on Monday 07-21-2020 three of the candidate vaccines have published their preliminary clinical results. The University of Oxford-AstraZeneca, the Chinese consortium CanSino Biologics, and Moderna, the American multinational. There is a fourth consortium at this stage: Pfizer-BioNTech (Switzerland-Germany). The World Health

Organization collaborates and supports the development of these promising vaccines to combat COVID-19. This situation leads immediately to phase 3: The international, multi-centered, randomized, double-blind, and controlled effectiveness trial. This represents the greatest global public health challenge of our generation.

Both Oxford and CanSino Biologics vaccines are based on an adenovirus that causes the common cold in chimpanzees. This adenovirus was genetically modified so that it does not cause side effects or infections in humans and also to make it appear as similar to SARS-CoV-2 as possible. To modify the adenovirus, researchers transferred the DNA sequence encoding the SARS-CoV-2 “spike protein” or S protein. This protein is what gives the virus entry into our cells, using a protein that is found in our cell membranes called the ACE2 human receptor. It seems that the coronavirus S protein evolved in one of two animals, bats and/or pangolins, and managed to mutate to fit in a lock and key manner with the ACE2 protein. In conclusion, Oxford and CanSino vaccines resemble the coronavirus, and this gives the immune system a chance to learn how to attack it.

Unlike traditional vaccines, vaccines developed by Moderna and Pfizer-BioNTech use messenger RNA to trigger the production of the “spike protein” of the SARS-CoV-2, just like Oxford and CanSino vaccines. Participants in the vaccine prospect evaluation were given a low, medium, or high dose. The higher dose caused more side effects. However, volunteers who received the lowest dose produced the same level of antibodies detected in recovered COVID-19 cases. Those who received medium doses had significantly more antibodies than recovered patients.

Messenger RNA vaccines are produced from a DNA fragment that is transcribed in vitro in a cell-free system. The produced messenger RNA is injected into the patient and then this genetic material infects a dendritic cell by endocytosis. The mRNA molecule exits into the cytoplasm and the synthesis of protein S, which encodes what we call the antigen, takes place in the ribosomes. This antigen gives rise to antigen-specific cellular immune responses. The vaccine does not integrate genomic information in the host (humans) because the process takes place in the cytoplasm and not in the nucleus. Additionally, when produced in a cell-free environment, the probability of contamination with bacterial components is extremely reduced.

After this simple and crude explanation, the only thing I can conclude is that the inventiveness of the scientists of our time is more than exciting, and the speed at which they work day and night is unmeasurable.

The virus advances, its only objective being to infect and replicate, even without realizing how much damage it causes in its attempt to do so. It does not want to kill, only defend its replicative capacity. If the S protein in vaccines produces the desired antibodies, all humans will be vaccinated. We would deny the virus entry to our cells and, therefore, it will not be able to replicate.

Questions still stand, though. ¿When exactly will a vaccine be available? ¿Will everyone be able to get the vaccine in a timely manner? And, ¿for how long will it give us immunity? Six months? A year? Therein lies the question.

REFERENCE

Zhu, F. C., Guan, X. H., Li, Y. H., Huang, J. Y., Jiang, T., Hou, L. H., ... & Wu, S. P. (2020). Immunogenicity and safety of a recombinant adenovirus type-5-vectored COVID-19 vaccine in healthy adults aged 18 years or older: A randomised, double-blind, placebo-controlled, phase 2 trial. *The Lancet*. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31605-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31605-6)

Javier Hernández Fernández

Editor Revista Mutis

<https://orcid.org/0000-0001-8442-9266>

<https://doi.org/10.21789/22561498.1636>

Diseño de una columna empacada y una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol.

2. Diseño de la torre de bandejas perforadas

Design of a Packed-Bed Column and a Sieve Tray Tower for Ethanol Absorption. 2. Sieve Tray Tower Design

Amaury Pérez Sánchez¹

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Aplicadas,
Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Cuba
<http://orcid.org/0000-0002-0819-6760> | amaury.psanchez@reduc.edu.cu

Eddy Javier Pérez Sánchez

Dirección Comercial, Empresa Servicios Automotores S. A., Cuba
<https://orcid.org/0000-0003-4481-1262> | eddypsanchez@nauta.cu

Mahel Gabriel Bodaño Hernández

Laboratorio Central, Empresa Cervecería Tímina, Camagüey, Cuba
<https://orcid.org/0000-0003-3090-1099> | mahel@tinima.cu

¹ Autor de correspondencia.

Fecha de recepción: 7 de junio de 2019

Fecha de aprobación: 25 de septiembre de 2019

Sugerencia de citación: Pérez-Sánchez, A., Pérez-Sánchez, E. J. y Bodaño-Hernández, M. G. (2020). Diseño de una columna empacada y una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol. 2. Diseño de la torre de bandejas perforadas. *Mutis*, 10 (1), 8-24. doi:10.21789/22561498.1580

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño de una torre de bandejas perforadas para efectuar un proceso de absorción de etanol gaseoso empleando agua como solvente. El resultado de costo obtenido se comparó con el costo de la columna empacada diseñada por Pérez *et al.* (2019) con el fin de seleccionar el equipo más adecuado desde el punto de vista económico. La torre tuvo un diámetro de 0,404 m, una caída de presión del gas de 0,783 kPa/bandeja —inferior a la máxima caída de presión establecida por el sistema (1,0 kPa/bandeja)— y un flujo de arrastre de 0,018 kg/s (64,8 kg/h), el cual puede calificarse como aceptable. La eficiencia de la bandeja de *Murphree* corregida por flujo de arrastre fue igual a 0,829, mientras que la torre presentó 11 bandejas o etapas en total. La torre de

bandejas perforadas tuvo un costo aproximado de USD 15.315, siendo 1,44 veces inferior al costo de la columna empacada determinado por Pérez *et al.* (2019). Se concluye que resulta más factible, desde el punto de vista económico, adquirir la torre de bandejas perforadas para llevar a cabo el proceso de absorción establecido en este proyecto.

Palabras clave: caída de presión, diámetro, eficiencia de *Murphree*, número de etapas, torre de bandejas perforadas.

ABSTRACT

This work explains the design of a sieve tray tower for gaseous ethanol absorption using water as solvent. The resulting cost was compared with that of the packed column designed by Pérez *et al.* (2019) in order to select the most suitable equipment from an economic point of view. The tower had a diameter of 0.404 m, a gas pressure drop of 0.783 kPa/tray, which is inferior to the maximum pressure drop established by the system (1.0 kPa/tray), and the entrainment flow had a value of 0.018 kg/s (64.8 kg/h), which can be considered acceptable. The entrainment-corrected *Murphree* tray efficiency was 0.829, while the tower had 11 trays or stages in total. The sieve tray tower had an approximate cost of USD 15,115, being 1.44 times lower than the cost of the packed column determined by Pérez *et al.* (2019). From an economic point of view, this work concludes that it is more feasible to acquire the sieve tray tower to carry out the absorption process established in this project.

Keywords: Pressure drop, diameter, *Murphree* efficiency, stages number, sieve tray tower.

INTRODUCCIÓN

Las torres de bandejas son cilindros verticales en los cuales el líquido y el gas establecen contacto en un arreglo por etapas sobre bandejas o platos. El líquido entra por el tope y fluye hacia abajo por gravedad. En su camino, el líquido fluye a través de la bandeja y es dirigido hacia la bandeja inferior por medio del tubo de bajada (*downcomer*). El gas, por su parte, transita hacia arriba por el interior de aberturas colocadas en la bandeja, burbujeando a través del líquido para formar una espuma y luego separarse de esta, para luego transitar hacia la siguiente bandeja, ubicada encima. Se obtiene como efecto global un contacto múltiple a contracorriente entre el gas y el líquido que se caracteriza por el flujo cruzado de ambos fluidos. Cada bandeja de la torre es considerada como una etapa debido a que los fluidos son puestos en contacto íntimo entre sí, ocurriendo difusión interfacial entre ellos, para luego ser separados. El número de etapas de equilibrio (bandejas teóricas) de una torre depende solamente de la dificultad del proceso de separación y se determina directamente a partir de los balances de masa y consideraciones de equilibrio líquido-vapor (Benitez, 2009).

Las torres de bandejas constituyen el tipo de equipo de transferencia de masa más empleado en la actualidad para llevar a cabo operaciones de absorción y destilación. El número de etapas o bandejas a utilizar en la torre dependerá del grado de pureza deseado y de la dificultad de la operación de separación. Estos equipos son más eficientes para efectuar un determinado proceso de separación en comparación con las columnas empacadas (Eranda, 2016). Para ello, se emplean diferentes tipos de bandejas, cuya selección depende del grado de pureza requerido para el producto de interés, los tipos de fluidos manejados y sus caudales y las dimensiones de los diferentes accesorios que contiene, entre otros parámetros.

La eficiencia de la etapa, y por tanto el número real de bandejas, se determina a partir del diseño mecánico establecido y las condiciones de operación. El diámetro de la torre, por su parte, depende de las cantidades de gas y líquido que fluyen a través de la torre por unidad de tiempo y de las propiedades físicoquímicas de los fluidos que se procesan.

Debido a su simplicidad y bajo costo, las bandejas perforadas constituyen hoy en día los tipos de bandejas más importantes en el área de la destilación y absorción (Eranda, 2016). Estos mecanismos están conformados por placas de metal con huecos de diversos números, tamaños y patrones de construcción, donde el vapor es dirigido directamente hacia arriba a través del líquido que fluye por encima de las bandejas. Durante el diseño de bandejas perforadas es necesario definir un diámetro de la torre para acomodar los caudales a manejar. Así mismo, se debe seleccionar los detalles del arreglo de las bandejas, estimar la caída de presión del gas, el acercamiento a la inundación y asegurar el equipo para que no ocurra arrastre y/o derrame excesivo (Benitez, 2009). Estas bandejas ofrecen una elevada capacidad de procesamiento y eficiencia de separación, baja caída de presión, facilidad de fabricación y limpieza y bajos costos de capital (Eranda, 2016).

Las torres de bandejas han sido objeto de estudio tanto en cuestiones relacionadas con su diseño (Anand & Ericsson, 1999; Pilling, 2006; Zavaleta-Aguilar & Simões-Moreira, 2012), eficiencia (Cheng & Chuang, 1993; Lamprecht, 2017; Zahedi *et al.*, 2010), evaluación del rendimiento (Olivier & Eldridge, 2002; Outili *et al.*, 2013) y cálculo del número de bandejas (Azizi *et al.*, 2015), así como en lo relacionado con sus aplicaciones y aspectos generales (Benitez, 2009; Kister, 1992; Lockett, 1986; Rose, 1985).

El presente trabajo tiene como objetivo llevar a cabo el diseño de una torre de bandejas perforadas para efectuar la absorción de etanol contenido en una corriente gaseosa mediante el uso de agua como solvente. Para ello, se emplean correlaciones y ecuaciones publicadas fundamentalmente por autores como Treybal (1980), Lockett (1986), Seader y Henley (1998), Perry y Green (2008) y Benitez (2009). Además, se determina el diámetro de la torre, la caída de presión total, el flujo de arrastre, la eficiencia de *Murphree* de la bandeja corregida por efectos del arrastre y el número total real de bandejas o etapas. Por último, se establece el costo capital de la torre para el año 2018 y se compara el resultado obtenido con el valor de costo determinado durante el diseño de una columna empacada (Pérez *et al.*, 2019) para luego seleccionar el equipo de menor costo económico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Definición del problema

Debido a un proceso fermentativo a escala industrial se obtienen 680 m³/h de una mezcla gaseosa compuesta por 86 % mol de dióxido de carbono (CO₂) y 14 % mol de etanol, a una temperatura de 25 °C (303 K) y 1,1 atm de presión. Se desea recuperar el 98 % del etanol contenido en esta corriente gaseosa mediante un proceso de absorción a contracorriente empleando agua como solvente, un caudal disponible de 900 kg/h y una temperatura de 25 °C (298 K). Por ello, se requiere diseñar una torre de bandejas perforadas para cumplir con los requerimientos señalados. La máxima caída de presión permisible para la corriente gaseosa no deberá superar 1,0 kPa/bandeja. Así mismo, esta se deberá operar bajo un 80 % de inundación bajo condiciones isotérmicas (figura 1).

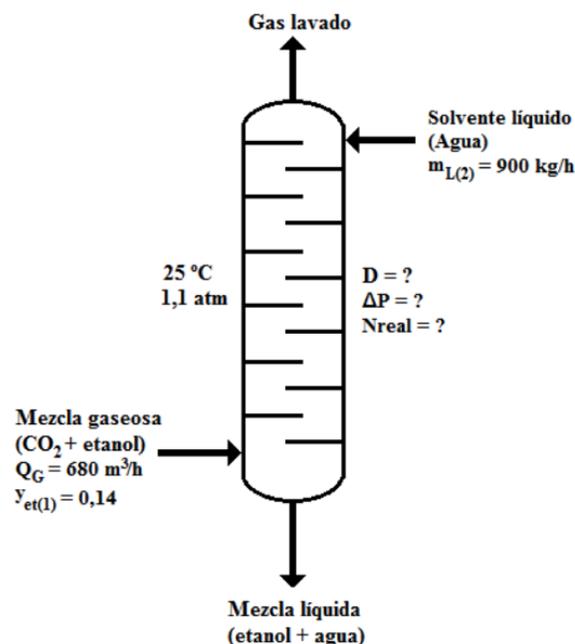


Figura 1. Esquema del proceso de absorción.
Fuente: elaboración propia.

Debido a que el sistema de absorción opera a baja presión y temperatura (1,1 atm y 298 K, respectivamente), el gas soluto se encuentra altamente diluido en la fase líquida (esto es, la fase líquida puede clasificarse como una solución líquida diluida), el sistema opera bajo condiciones isotérmicas y no existe reacción química entre el soluto disuelto (etanol) y el sol-

vente (agua). Por lo anterior, se asume que el sistema obedece la Ley de Henry (Benitez, 2009; Perry & Green, 2008; Rose, 1985; Treybal, 1980). Según Perry y Green (2008), el valor de la constante de Henry para un sistema etanol/agua operando a 25 °C es $H = 0,272$. De esta manera, el coeficiente de distribución (ϕ) para el sistema gas-líquido (sistema etanol-agua) a 25 °C y 1,1 at es $\phi = H/P = 0,272/1,1 = 0,229$.

Parámetros de diseño de la torre inicial

La tabla 1 muestra los parámetros de diseño de la torre inicial requeridos para efectuar los cálculos de diseño del equipo.

Características de la bandeja

La bandeja tendrá las características señaladas en la tabla 2. Además, cada bandeja presentará un arreglo equilateral-triangular y será elaborada en acero inoxidable.

Tabla 1. Parámetros de diseño de la torre inicial requeridos para realizar el diseño del equipo

Parámetro	Valor	Unidades
Mezcla gaseosa		
Caudal volumétrico ($Q_{G(1)}$)	680	m ³ /h
Fracción molar del dióxido de carbono [$y_{CO_2(1)}$]	0,86	-
Fracción molar del etanol [$y_{et(1)}$]	0,14	-
Temperatura (T_G)	298	K
Presión (P_G)	110	kPa
Líquido		
Caudal másico [$m_{L(2)}$]	900	kg/h
Temperatura (T_L)	298	K
Densidad a 25 °C (ρ_L)	997,047	kg/m ³
Viscosidad a 25 °C (μ_L)	0,890*10 ⁻³	Pa.s
Tensión superficial a 25 °C (σ_L)	70	dinas/cm
Otros datos		
Masa molar del dióxido de carbono (M_{CO_2})	44,01	kg/kmol
Masa molar del etanol (M_{et})	46,07	kg/kmol
Masa molar del agua (M_{H_2O})	18,02	Kg/kmol
Viscosidad del CO ₂ gaseoso (μ_{CO_2})	1,496x10 ⁻⁵	Pa.s
Viscosidad del etanol gaseoso (μ_{et})	8,929x10 ⁻⁶	Pa.s
% de recuperación de etanol requerido (%Rec _{et})	98	%
Factor de inundación torre de bandejas ($f_{i(tb)}$)	0,8	-
Aceleración de la gravedad (g)	9,81	m/s ²
Constante del gas ideal (R)	0,0821	m ³ .atm/kmol.K
Constante de Henry (H)	0,252	atm
Coefficiente de distribución (ϕ)	0,229	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Características de la bandeja

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro de la perforación o hueco (d_0)	0,005	m
Espaciado entre las bandejas (e_b)	0,5	m
Paso o distancia entre los centros de perforación en la bandeja perforada (p)	0,015	m
Espesor de las bandejas (s)	0,003	m
Altura del vertedero (h_{vert})	0,005	m

Fuente: elaboración propia.

Diámetro de la torre

El diámetro de la torre de bandejas perforadas se determinará empleando correlaciones establecidas por Treybal (1980) y Benitez (2009). El diámetro determinado, y por consiguiente su área de sección transversal, deberá ser lo suficientemente grande para manejar los diferentes caudales de

líquido y gas dentro de intervalos de flujo satisfactorios (Benitez, 2009).

En primer lugar, se determinarán el peso molecular (M_G), la densidad (ρ_G), la viscosidad (μ_G) y el caudal másico (m_G) de la mezcla gaseosa mediante las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

$$M_G = y_{CO2(1)} \cdot M_{CO2} + y_{et(1)} \cdot M_{et} \quad [\text{kg/kmol}] \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\rho_G = \frac{M_G}{22,4} \cdot \frac{273 \cdot P_G}{T_G \cdot P_0} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde $P_0 = 100$ kPa

$$\mu_G = \frac{M_G}{\left(\frac{y_{et(1)} \cdot M_{et}}{\mu_{et}} \right) + \left(\frac{y_{CO2(1)} \cdot M_{CO2}}{\mu_{CO2}} \right)} \quad [\text{Pa.s}] \quad (\text{Ec. 3})$$

$$m_{G(1)} = Q_{G(1)} \cdot \rho_G \quad [\text{kg/h}] \quad (\text{Ec. 4})$$

A continuación, se calcula la relación área de hueco de vapor/área activa de la bandeja (A_h/A_a); el factor α ; el factor β ; el coeficiente C_f y el factor de tensión

superficial ($F_{T\tau}$) mediante las ecuaciones 5, 6, 7, 8 y 9, respectivamente.

$$\frac{A_h}{A_a} = 0,907 \cdot \left[\frac{d_0}{p} \right]^2 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\alpha = 0,0744 \cdot e_b + 0,01173 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\beta = 0,0304 \cdot e_b + 0,015 \quad (\text{Ec. 7})$$

$$C_F = \alpha \cdot \log \frac{1}{X} + \beta \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

$X = 0,036$ (Pérez, Pérez, & Liaño, 2019) :

$$F_{TS} = \left[\frac{\sigma_L}{20} \right]^{0,2} \quad (\text{Ec. 9})$$

Luego, el factor empírico C se determina mediante la ecuación 10.

$$C = F_{TS} \cdot F_E \cdot F_{HA} \cdot C_F \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

F_E – Factor de espuma = 0,9 para columnas que llevan a cabo la absorción de alcohol (Kister, 1992):

$F_{HA} = 1,0$ cuando $A_h/A_a \geq 0,10$, y

$= 5(A_h/A_a) + 0,5$ cuando $A_h/A_a < 0,10$

La velocidad superficial del gas (v_{SG}) será:

$$v_{SG} = C \cdot \left[\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right]^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Ec. 11})$$

El diámetro de la torre de bandejas perforadas (D_{torre}) se determinará según la siguiente correlación:

$$D_{torre} = \left[\frac{4 \cdot Q_{G(l)}}{f_{i(tb)} \cdot v_{SG} \cdot \left(1 - \frac{A_{tubo}}{A_T} \right) \cdot \pi} \right]^{0,5} \quad [\text{m}] \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

$$\begin{aligned} A_{tubo}/A_T &= 0,1 && \text{si } X \leq 0,1 \\ &= 0,1 + \frac{X - 0,1}{9} && \text{si } 0,1 < X < 1,0 \\ &= 0,2 && \text{si } X \geq 1,0 \end{aligned}$$

información presentada en la tabla 3 (con respecto al valor de espaciado de las bandejas [e_b] asumido al inicio).

A continuación, se determinarán otros parámetros de la torre de bandejas, tales como ángulo del *downcomer* [θ] (ecuación 13); longitud del vertedero [L_{vert}] (ec. 14); la distancia del vertedero desde el centro de la torre

El valor obtenido de diámetro de la torre de bandejas perforadas deberá ser verificado mediante la

$[r_{vert}]$ (ec. 15); el área de sección transversal total $[A_T]$ (ec. 16); el área del *downcomer* $[A_{tubo}]$ (ec. 17); el área

activa sobre la bandeja $[A_a]$ (ec. 18); y el área total del hueco $[A_h]$ (ec. 19).

Tabla 3. Espaciado de bandeja recomendado según el valor del diámetro de la torre

Diámetro de la torre (D_{torre}) [m]	Espaciado de las bandejas (e_b) [m]
1 o menos	0,50
1-3	0,60
3-4	0,75
4-8	0,90

Fuente: Treybal (1980).

$$\frac{A_{tubo}}{A_T} = \frac{\theta - \text{sen}\theta}{2\pi} \quad \text{[radianes]} \quad \text{(Ec. 13)}$$

$$L_{vert} = \text{sen}\left[\frac{\theta}{2}\right] \cdot D_{torre} \quad \text{[m]} \quad \text{(Ec. 14)}$$

$$r_{vert} = \frac{1}{2} \cdot \text{cos}\left[\frac{\theta}{2}\right] \cdot D_{torre} \quad \text{[m]} \quad \text{(Ec. 15)}$$

$$A_T = \frac{\pi \cdot (D_{torre})^2}{4} \quad \text{[m}^2\text{]} \quad \text{(Ec. 16)}$$

$$A_{tubo} = 0,1 \cdot A_T \quad \text{si } X \leq 0,1$$

$$= \left(0,1 + \frac{X - 0,1}{9}\right) \cdot A_T \quad \text{si } 0,1 < X < 1,0 \quad \text{[m}^2\text{]} \quad \text{(Ec. 17)}$$

$$= 0,2 \cdot A_T \quad \text{si } X \geq 1,0$$

$$A_a = A_T - 2 \cdot A_{tubo} \quad \text{[m}^2\text{]} \quad \text{(Ec. 18)}$$

$$A_h = 0,907 \cdot \left[\frac{d_0}{p}\right]^2 \cdot A_a \quad \text{[m}^2\text{]} \quad \text{(Ec. 19)}$$

Caída de presión

La caída de presión típica para el flujo de vapor en una torre oscila entre 0,3 y 1.0 kPa/bandeja (Benitez, 2009). La caída de presión (expresada como pérdida de carga) para las bandejas perforadas se debe a: (i) la fricción que ocasiona el flujo de vapor a través de las perforaciones de la bandeja, (ii) la acumulación de

líquido en la bandeja y (iii) las pérdidas por tensión superficial.

Pérdida de carga de la bandeja seca (h_s)

Se determina el coeficiente del orificio (C_0) a través de la siguiente ecuación

$$C_0 = 0,85032 - 0,04231 \cdot \frac{d_0}{s} + 0,0017954 \cdot \left(\frac{d_0}{s}\right)^2 \quad (\text{Ec. 20})$$

La cual es válida solo si se cumple:

$$\frac{d_0}{s} \geq 1,0$$

La velocidad del hoyo o hueco (v_h) será:

$$v_h = \frac{Q_{G(1)}}{A_h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Ec. 21})$$

Luego, la pérdida de carga de la bandeja seca (h_d) se halla mediante la ecuación 22:

$$h_s = 0,0051 \cdot \left[\frac{v_h}{C_0}\right]^2 \cdot \rho_G \cdot \left[\frac{\rho_{H2O}}{\rho_L}\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{A_h}{A_a}\right)^2\right] \quad [\text{cm}] \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde ρ_{H2O} es la densidad del agua a la temperatura del líquido utilizado para el lavado [solvente] (kg/m^3).

Pérdida de carga del líquido claro sobre la bandeja (h_i)

La pérdida de carga del líquido claro sobre la bandeja (h_i) depende de la altura del vertedero, la densidad del líquido y del vapor y de la longitud del *downcomer*. De esta manera, la velocidad superficial del gas

con base en el área activa de la bandeja (v_a), el parámetro de capacidad (K_s), la densidad relativa efectiva de la espuma (ϕ_e), el caudal volumétrico del líquido a través de la bandeja ($Q_{L(1)}$), el coeficiente (C_i) y la carga equivalente del líquido claro en la bandeja [caída de presión] (h_i) serán calculadas mediante las ecuaciones 23, 24, 25, 26, 27 y 28, respectivamente.

$$v_a = \frac{Q_{G(1)}}{A_a} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Ec. 23})$$

$$K_s = v_a \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}\right)^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\phi_e = \exp(-12,55 \cdot K_s^{0,91}) \quad (\text{Ec. 25})$$

$$Q_{L(1)} = \frac{m_{L(1)}}{\rho_L} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{Ec. 26})$$

$$C_i = 50,12 + 43,89 \cdot \exp(-1,378 \cdot h_{vert}) \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde h_{vert} se da en centímetros (cm).

$$h_l = \phi_e \cdot \left[h_{vert} + C_l \cdot \left(\frac{Q_{L(1)}}{L_{vert} \cdot \phi_e} \right)^{2/3} \right] \quad [\text{cm}] \quad (\text{Ec. 28})$$

Pérdida de carga debido a la tensión superficial (h_σ)

Las burbujas deben vencer la tensión superficial a medida que el gas emerge de las perforaciones de la bandeja. La caída de presión debida a la tensión

superficial está dada por la diferencia entre la presión dentro de la burbuja y de aquella del líquido, según la siguiente correlación teórica:

$$h_\sigma = \left(\frac{6 \cdot \sigma_L}{g \cdot \rho_L \cdot d_0} \right) \cdot 100 \quad [\text{cm}] \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde σ_L se da en N/m y d_0 en m. Se asume que el tamaño máximo de la burbuja puede tomarse como el diámetro de la perforación (d_0).

Caída de presión total por bandeja (h_t)

La caída de presión total por bandeja (h_t) se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$h_t = h_s + h_l + h_\sigma \quad [\text{cm/bandeja}] \quad (\text{Ec. 30})$$

La cual también se puede expresar como:

$$\Delta P_t = \frac{h_t \cdot \rho_L \cdot g}{1000} \quad [\text{Pa/bandeja}] \quad (\text{Ec. 31})$$

Flujo o caudal de arrastre

Para que una bandeja opere a una alta eficiencia, el goteo de líquido a través de las perforaciones de la bandeja deberá ser pequeño en comparación con el flujo sobre el vertedero de drenaje y hacia el *downcomer*. Así mismo, el arrastre de líquido por el gas no deberá ser excesivo. El goteo de líquido ocurre cuando

existen bajas velocidades de vapor y/o elevados caudales de líquido. Se reporta que el goteo de líquido no degrada de forma sustancial el rendimiento de la bandeja, siempre y cuando se cumpla lo planteado por Benitez (2009):

$$Fr_h = \left(\frac{\rho_G \cdot v_h^2}{\rho_L \cdot g \cdot h_l} \right)^{0,5} \geq 0,5 \quad [\text{Pa/bandeja}] \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde h_l se da en metros (m).

Una vez se calcule el número de *Froude* del hueco u orificio mediante la ecuación 32, se procede a estimar

la constante k (ec. 33), la altura de la región bifásica en la bandeja [$h_{2\phi}$] (ec. 34), el arrastre fraccional [A_f] (ec. 35) y el caudal másico del arrastre [Q_A] (ec. 36).

$$k = 0,5 \left[1 - \tanh \left(1,3 \cdot \ln \frac{h_l}{d_0} - 0,15 \right) \right] \quad (\text{Ec. 33})$$

Donde tanto h_l como d_0 se dan en milímetros (mm).

$$h_{2\phi} = \frac{h_l}{\phi_e} + 7,79 \cdot \left[1 + 6,9 \cdot \left(\frac{d_0}{h_l} \right)^{1,85} \right] \cdot \frac{K_s^2}{\phi_e \cdot g \cdot \left(\frac{A_h}{A_a} \right)} \quad [\text{m}] \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde tanto h_l como d_0 se dan en metros (m).

$$A_f = 0,00335 \cdot \left(\frac{h_{2\phi}}{e_b} \right)^{1,1} \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{h_l}{h_{2\phi}} \right)^k \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde h_l y e_b se dan en metros (m).

$$Q_A = \frac{m_{G(1)}}{3600} \cdot A_f \quad [\text{kg/s}] \quad (\text{Ec. 36})$$

Eficiencia de *Murphree* de la bandeja

La eficiencia de la bandeja es el acercamiento fraccional hacia una etapa en equilibrio que es alcanzada por una bandeja real. Para determinar el número real de etapas requeridas para lograr una separación dada, deberá ajustarse el número de etapas de equilibrio

con la eficiencia de la etapa o eficiencia de la bandeja. De esta manera, se calcula el número de Reynolds fraccional (Re_F), la concentración molar del gas (c_G), la concentración molar del líquido (c_L) y la eficiencia puntual de la bandeja en fase gaseosa (E_{0G}) utilizando las ecuaciones 37, 38, 39 y 40, respectivamente.

$$Re_F = \frac{\rho_G \cdot v_h \cdot h_l}{\mu_G \cdot \phi_e} \quad [\text{kg/s}] \quad (\text{Ec. 37})$$

$$c_G = \frac{\rho_G}{M_G} \quad [\text{kmol/m}^3] \quad (\text{Ec. 38})$$

$$c_L = \frac{\rho_L}{M_L} \quad [\text{kmol/m}^3] \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde $M_L = 20,12 \text{ kg/kmol}$ (Pérez *et al.*, 2019).

$$E_{0G} = 1 - \exp \left(- \frac{0,0029}{1 + m \cdot \frac{c_G}{c_L} \cdot \frac{D_G(\phi) - \phi_e}{\sqrt{D_L \cdot \left(\frac{A_h}{A_a} \right)}}} \cdot Re_F^{0,4136} \cdot \left(\frac{h_l}{d_0} \right)^{0,6074} \cdot \left(\frac{A_h}{A_a} \right)^{-0,3195} \right) \quad (\text{Ec. 40})$$

Donde:

$D_G = 8,21 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $D_L = 1,36 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (Pérez *et al.*, 2019).

A continuación, se determina el grado de mezclado de la fase de vapor. Para ello, se calcula el número de

Peclet de la fase de vapor o gaseosa [Pe_G] (Katayama & Imoto, 1972):

$$Pe_G = \frac{4 \cdot Q_{G(1)} \cdot r_{vert}^2}{A_a \cdot (e_b - h_{2\phi}) \cdot D_{EG}} \quad (Ec. 41)$$

La cual es válida si se cumple que: $\frac{h_{2\phi}}{e_b} < 1$

Donde:

D_{EG} – Difusividad de remolino del gas = 0,01 m²/s (Lockett, 1986)

Si $Pe_G > 50$ puede considerarse el vapor como no mezclado.

Por último, se determinan la difusividad de remolino del líquido [D_{EL}] (ecuación 42), el número de *Peclet* del líquido [Pe_L] (ec. 43), el coeficiente N (ec. 44), el factor de absorción [λ] (ec. 45); la eficiencia de *Murphree* de la bandeja [E_{MG}] (ec. 46) y la eficiencia de *Murphree* de la bandeja corregida por arrastre [E_{MGA}] (ec. 47).

$$D_{EL} = 0,1 \cdot [g \cdot h_{2\phi}^3]^{0,5} \quad [m^2/s] \quad (Ec. 42)$$

$$Pe_L = \frac{4 \cdot Q_{L(1)} \cdot r_{vert}^2}{A_a \cdot h_l \cdot D_{EL}} \quad (Ec. 43)$$

$$N = \frac{Pe_L + 2}{2} \quad (Ec. 44)$$

$$\lambda = \varphi \cdot \frac{\frac{m_{G(1)}}{M_G}}{\frac{m_{L(1)}}{M_L}} \quad (Ec. 45)$$

Donde:

$m_{G(1)} = 0,376$ kg/s y $m_{L(1)} = 0,302$ kg/s (Pérez *et al.*, 2019)

$$E_{MG} = \frac{\left[1 + \frac{\lambda \cdot E_{OG}}{N}\right]^N - 1}{\lambda} \quad (Ec. 46)$$

$$E_{MGA} = E_{MG} \cdot \left[1 - \frac{0,8 \cdot E_{OG} \cdot \lambda^{1,543} \cdot Q_A}{\varphi}\right] \quad (Ec. 47)$$

Número de etapas o bandejas

Primero, se determinará el número de etapas o bandejas ideales (N_{ideal}) mediante la ecuación 48. Luego,

$$N_{ideal} = \frac{\ln \left[\frac{y_{et(1)} - \varphi \cdot x_{et(2)}}{y_{et(2)} - \varphi \cdot x_{et(2)}} \cdot \left(1 - \frac{1}{A} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln A} \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde:

$$y_{et(1)} = 0,14$$

$$x_{et(2)} = 0$$

$$y_{et(2)} = (1 - \%Rec_{et}) \cdot y_{et(1)}$$

$$A = 7,397 \text{ (Pérez et al., 2019).}$$

$$E_0 = \frac{\ln \left[1 + E_{MGA} \cdot \left(\frac{1}{A} - 1 \right) \right]}{\ln \left(\frac{1}{A} \right)} \quad (\text{Ec. 49})$$

$$N_{real} = \frac{N_{ideal}}{E_0} \quad (\text{Ec. 50})$$

Cálculos económicos

El costo de la torre de platos perforados será calculado mediante la figura 14.84 presentada en el trabajo de Perry y Green (2008, pp. 14-88). En esta figura, el

costo establecido tiene como fecha de referencia el mes de enero de 1979. Para actualizar dicho costo al año 2018 se empleará la siguiente ecuación (Peters & Timmerhaus, 1991):

$$C_{torre(2018)}^b = C_{torre(1979)}^b \cdot \frac{I_{(2018)}}{I_{(1979)}} \quad [\$] \quad (\text{Ec. 51})$$

Donde:

$C_{torre(2018)}^b$ – Costo de la torre de bandejas en el año 2018 [USD]

$C_{torre(1979)}^b$ – Costo de la columna en el año 1979 [USD]

$I_{(2018)}$ – Índice de costo del año 2018

$I_{(1979)}$ – Índice de costo del año 1979

En la mencionada figura el costo de la columna está referido por bandeja (USD/bandeja).

se calculará la eficiencia total de la bandeja en cascada (E_0) a través de la ecuación 49. Por último, se hallará el número real de bandejas (N_{real}) según la ecuación 50.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las tablas 4, 5, 6, 7 y 8 muestran los resultados de las diferentes variables determinadas durante el cálculo del diámetro de la torre, la caída de presión, el flujo de arrastre, la eficiencia de *Murphree* de la bandeja y el número real total de etapas, respectivamente.

Tabla 4. Resultados obtenidos durante la determinación del diámetro de la torre

Parámetro	Ecuación	Valor	Unidades
M_G	(1)	44,30	kg/kmol
ρ_G	(2)	1,993	kg/m ³
μ_G	(3)	$1,362 \cdot 10^{-5}$	Pa.s
$m_{G(1)}$	(4)	1355,2	kg/h
A_h/A_a	(5)	0,101	-
α	(6)	0,0489	-
β	(7)	0,0302	-
C_F	(8)	0,0791	m/s
F_{TS}	(9)	1,285	-
C	(10)	0,0915	m/s
v_{SG}	(11)	2,044	m/s
θ	(13)	1,627	radianes
L_{vert}	(14)	0,294	m
r_{vert}	(15)	0,139	m
A_T	(16)	0,128	m ²
A_{tubo}	(17)	0,0128	m ²
A_a	(18)	0,1027	m ²
A_h	(19)	0,0103	m ²
D_{torre}	(12)	0,404	m

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resultados obtenidos durante el cálculo de la caída de presión

Parámetro	Ecuación	Valor	Unidades
d_0/s	-	1,67'	m
C_0	(20)	0,785	-
v_h	(21)	18,26	m/s
h_s	(22)	5,45	cm
v_a	(23)	1,840	m/s
K_S	(24)	0,0823	m/s
φ_e	(25)	0,274	-
$Q_{L(1)}$	(26)	0,00030	m ³ /s
C_i	(27)	50,16	-
h_l	(28)	1,70	cm
h_σ	(29)	0,86	cm
h_t	(30)	8,01	cm/bandeja
ΔP_t	(31)	0,783	kPa/bandeja

* Como se cumple que $d_0/s > 1,0$, se puede emplear la ecuación 20 para determinar el coeficiente de orificio (C_0).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados obtenidos al determinar el flujo de arrastre

Parámetro	Ecuación	Valor	Unidades
Fr_h	(32)	2,00	-
k	(33)	0,0528	-
$h_{2\phi}$	(34)	0,396	m
A_f	(35)	0,049	-
Q_A	(36)	0,018	kg/s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resultados obtenidos al determinar la eficiencia de la bandeja

Parámetro	Ecuación	Valor	Unidades
Re_F	(37)	$1,66 \cdot 10^5$	-
c_G	(38)	0,0450	kmol/m ³
c_L	(39)	49,56	kmol/m ³
E_{OG}	(40)	0,827	-
$h_{2\phi}/e_b$	-	0,79*	-
Pe_G	(41)	136,71	-
D_{EL}	(42)	0,0781	m ² /s
Pe_L	(43)	0,171	-
N	(44)	1,085	-
λ	(45)	0,130	-
E_{MG}	(46)	0,831	-
E_{MGA}	(47)	0,829	-

* Como se cumple que $h_{2\phi}/e_b < 1,0$, entonces se puede emplear la ecuación (41) para determinar el número de Peclet de la fase gaseosa o de vapor.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Resultados obtenidos al calcular el número real total de etapas o bandejas

Parámetro	Ecuación	Valor
N_{ideal}	(48)	6,74 (~ 7)
E_0	(49)	0,631
N_{real}	(50)	10,68 (~ 11)

Fuente: elaboración propia.

Según se puede observar en las tablas anteriores, se obtuvo un valor del diámetro de la torre (D_{torre}) igual a 0,404 m, siendo menor que 1,0 m, por lo que el espaciado de bandejas ($e_b = 0,50$ m) asumido al inicio es el correcto o recomendado para una torre con este valor de diámetro, de acuerdo con lo establecido por Treybal (1980) y Benitez (2009). Por otra parte, la caída de presión total fue de 0,783 kPa/bandeja, siendo inferior a la caída de presión máxima permisible para este sistema

de absorción (1,0 kPa/bandeja). También se obtuvo un flujo de arrastre de 0,018 kg/s (64,8 kg/h), que puede considerarse aceptable, tomando en cuenta los caudales manejados durante el proceso de absorción (Benitez, 2009). Se alcanzó además un valor de eficiencia de la bandeja de *Murphree* corregida para flujo de arrastre igual a 0,829, mientras que se requiere un total de 11 etapas o bandejas, aproximadamente, para cumplir con los requerimientos de este sistema de absorción.

Benitez (2009) lleva a cabo el diseño de una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol gaseoso utilizando agua como solvente, con un flujo de la mezcla gaseosa de 180 kmol/h (7929,21 kg/h) y una composición molar de CO₂ y etanol de 98 y 2 %, respectivamente. El caudal de agua utilizado es de 151,5 kmol/h (2729,27 kg/h) cuando se desea recuperar el etanol en un 97 %. Para estas condiciones de proceso se obtuvo un diámetro de torre de 0,989 m, una caída de presión de 0,817 kPa/bandeja, un flujo de arrastre de 0,110 kg/s (396 kg/h) y una eficiencia de la bandeja de *Murphree* corregida para flujo de arrastre igual a 0,811. Vale destacar que no se efectuó la determinación del número de bandejas o etapas. En el trabajo de Benitez (2009) se obtuvieron valores superiores de D_{torre} , ΔP_t y Q_A (en comparación con los estimados en este artículo) debido a que se emplearon mayores caudales máxicos tanto de gas como de líquido.

El crédito o mérito de este trabajo radica en que combina y aplica varias correlaciones y ecuaciones publicadas por diversas fuentes (Benitez, 2009; Lockett, 1986; Perry & Green, 2008; Seader & Henley, 1998; Treybal, 1980) con el fin de elaborar una metodología coherente, lógica y abarcadora que permita llevar a cabo el diseño de una columna de platos perforados para la absorción de un componente contenido en una corriente gaseosa, empleando para ello un solvente líquido. Con lo anterior, es posible determinar parámetros de importancia tales como el diámetro de la torre, la caída de presión, el flujo de arrastre, la eficiencia de *Murphree* y el número total de platos o bandejas perforadas. El objetivo principal consiste, entonces, en elaborar una metodología completa mediante la cual se pueda diseñar torres de platos perforados para aplicaciones donde se realice la absorción gas-líquido.

Costo de la torre

Por medio de la ecuación (51) se tiene que:

$$C_{torre(2018)}^b = C_{torre(1979)}^b \cdot \frac{I_{(2018)}}{I_{(1979)}} \quad [\$] \quad (\text{Ec. 51})$$

Donde:

$$C_{torre(1979)}^b = \$ 550/\text{bandeja} \text{ (Perry \& Green, 2008)}$$

$$I_{(2018)} = 605,2 \text{ (Junio 2018) (CEPCI, 2018)}$$

$$I_{(1979)} = 239,0 \text{ (Peters \& Timmerhaus, 1991)}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 51, el costo de la torre por bandeja:

$$C_{torre(2018)}^b = 550 \cdot \frac{605,2}{239,0}$$

$$C_{torre(2018)}^b = USD \$ 1392/\text{bandeja}$$

A continuación, tomando en cuenta el número total de bandejas que poseerá la torre, se obtiene un costo total de:

$$C_{torre(2018)} = C_{torre(2018)}^b \cdot N_{real} = 1392 \cdot 11 = 15314,8$$

$$C_{torre(2018)} \approx USD \$ 15\ 315$$

Por lo tanto, se requieren alrededor de USD 15.315 para adquirir una torre de bandejas perforadas conteniendo 11 bandejas y así cumplir con los requerimientos del proceso de absorción. Al comparar este costo con aquel obtenido para la columna de absorción con anillos Nor-Pac®, el cual fue de USD 22.000 (Pérez *et al.*, 2019), se concluye que resulta más económico adquirir la torre de bandejas perforadas para efectuar el proceso de absorción propuesto, pues esta última registra un costo 1,44 veces inferior al de la columna empacada, con lo cual se obtiene un ahorro de USD 6.685.

CONCLUSIONES

Se efectuó el diseño de una torre de absorción de bandejas perforadas utilizando correlaciones y ecuaciones descritas por Treybal (1980), Lockett (1986), Seader y Henley (1998), Perry y Green (2008) y Benitez (2009), con lo cual se determinan parámetros importantes como el diámetro de la torre, la caída de presión del gas y el número total de bandejas o etapas reales que tendrá este equipo.

Se obtuvo un diámetro de la torre de 0,404 m, por lo que el espaciado de bandejas asumido al inicio (0,5 m) es el correcto.

La caída de presión total del gas fue de 0,783 kPa/bandeja, la cual se encuentra por debajo del límite máximo permisible para este proceso de absorción (1,0 kPa/bandeja). Por otra parte, se obtuvo un flujo de arrastre de 0,018 kg/s (64,8 kg/h), el cual se considera aceptable.

Se obtuvo un valor de la eficiencia de la bandeja de *Murphree* corregida por flujo de arrastre igual a 0,829 (la torre tendrá 11 bandejas o etapas en total).

Se elaboró una metodología de cálculo completa e integral para llevar a cabo el diseño de columnas de platos perforados que involucre aplicaciones donde se realice la absorción gas-líquido.

La torre de bandejas tuvo un costo aproximado de USD 15.315, siendo este valor 1,44 veces inferior al costo de la columna empacada determinado por (Pérez *et al.* 2019). Teniendo en cuenta lo anterior, se concluye que resulta más factible, desde el punto de vista económico, adquirir la torre de bandejas perforadas para llevar a cabo este proceso de absorción.

REFERENCIAS

- Anand, G., & Erickson, D. C. (1999). Compact sieve-tray distillation column for ammonia-water absorption heat pump: Part I. E design methodology. *ASHRAE Trans*, 105, 796-803.
- Azizi, N. G., Ghomshe, S. M. T., & Vaziri, M. (2015). New calculation of the tray numbers for Debutanizer Tower in BIPC. *International Journal of Engineering Science Invention*, 4(8), 1-7.
- Benitez, J. (2009). *Principles and modern applications of mass transfer operations* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Chemical Engineering's Plant Cost Index [CEPCI] (2018). Economic indicators. *Chemical Engineering*, 125(10), 76.
- Cheng, G. X., & Chuang, K. T. (1993). Prediction of point efficiency for sieve tray in distillation. *Chem. Eng. Commun*, 189, 41-60.
- Eranda, H. (2016). *Design of o-xylene plate/tray distillation column*. University of Moratuwa.
- Katayama, H., & Imoto, T. (1972). Effect of vapor mixing on the tray efficiency of distillation columns. *J. Chem. Soc. Japan*, 9, 1745-1751. <https://doi.org/10.1246/nikkashi.1972.1745>
- Kister, H. Z. (1992). *Distillation design*. McGraw-Hill.
- Lamprecht, J. H. (2017). *The development of simplistic and cost-effective methods for the evaluation of tray and packed column efficiencies* (Master of Engineering thesis, Stellenbosch University). Stellenbosch University Scholar Research Repository. <https://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/100887>
- Lockett, M. J. (1986). *Distillation tray fundamentals*. Cambridge University Press.
- Olivier, E., & Eldridge, R. B. (2002). Prediction of the trayed distillation column mass transfer performance by neural network. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41, 3436-3446. <https://doi.org/10.1021/ie010499i>
- Outili, N., Chegga, N., Elbahi, K., & Meniai, A. H. (2013). Effect of downcomers sizes on tray column performance. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1981-1986.
- Pérez, A., Pérez, E. J., & Liaño, N. (2019). Diseño de una columna empacada y una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol. 1. Diseño de la columna empacada. *Mutis*, 9(1), 50-64. <https://doi.org/10.21789/22561498.1431>
- Perry, R. H., & Green, D. (2008). *Chemical Engineers' Handbook* (8th ed.). McGraw Hill.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). *Plant design and economics for chemical engineers* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Pilling, M. (2006). *Design considerations for high liquid rate tray applications*. AIChE Annual Meeting: Advances in Distillation Equipment and Applications, San Francisco, U.S.A.
- Rose, L. M. (1985). *Distillation design in practice*. Elsevier.

Seader, J. D., & Henley, E. J. (1998). *Separation process principles*. Wiley.

Treybal, R. E. (1980). *Mass-transfer operations* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Zahedi, G., Parvizian, F., & Rahimi, M. R. (2010). An expert model for estimation of distillation sieve tray efficiency based on artificial neural network approach. *Journal of Applied Sciences*, 10(12), 1076-1082. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.1076.1082>

Zavaleta-Aguilar, E. W., & Simões-Moreira, J. R. (2012). Thermal design of a tray-type distillation column of an ammonia/water absorption refrigeration cycle. *Applied Thermal Engineering*, 41, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.009>

Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia

Comparative Analysis of Impacts on Water Resources Generated by Major Landfills in Colombia

Diana Lucía Cristancho Montenegro

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Colombia
<https://orcid.org/0000-0001-7417-2583> | inge.dianacristancho26@gmail.com

Angie Stefany Torres Mejía

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-7083-3679> | atorresm6@ucentral.edu.co

Johan Fernando Lobatón Orduz

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-2422-8574> | jlobatono@ucentral.edu.co

Fecha de recepción: 30 de mayo de 2019

Fecha de aprobación: 30 de julio de 2019

Sugerencia de citación: Cristancho -Montenegro, D. L., Torres-Mejía, A. S. y Lobatón- Orduz, J. F. (2020). Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia. *Mutis*, 10 (1), 25-45. doi:10.21789/22561498.1601

RESUMEN

Este trabajo presenta una revisión del estado actual del tratamiento de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios (RESA) de Colombia, teniendo en cuenta el impacto ambiental negativo generado como consecuencia del vertimiento de estos compuestos, los cuales afectan directamente a las fuentes hídricas. Se realizó un diagnóstico que evidenció la existencia de 144 RESA en Colombia. Con base en la aplicación de un filtro que contempló las variables cantidad de habitantes, cantidad de toneladas de residuos generados y caudal del lixiviado generado, se determinó que 17 de estos RESA eran aptos como objeto de estudio. De estos, según la normatividad aplicable y las últimas caracterizaciones realizadas por entes de control, todos están por encima de los límites permisibles para el vertimiento de lixiviados, generando impactos negativos en algunos cuerpos de agua; principalmente, por la presencia de contaminantes de alta toxicidad como cadmio, cromo, plomo, bromo, zinc y mercurio, los cuales no pueden ser eliminados de manera natural en las fuentes de

agua y derivan en bioacumulación y la ocurrencia de catástrofes ambientales. Con base en lo anterior, se compararon los tratamientos con mayor eficiencia para la remoción de este tipo de contaminantes actualmente empleados en Colombia, considerando, además, los parámetros fisicoquímicos de cada uno de los 17 RESA estudiados. Como consecuencia, se determinó que el tratamiento con mejor eficiencia es la osmosis inversa. No obstante, se sugiere la implementación de pretratamientos a lo largo del sistema de los RESA. Así mismo, se determinó que el río Magdalena es el cuerpo de agua de mayor afectación debido a que 5 RESA vierten sus lixiviados en él.

Palabras clave: lixiviado, planta de tratamiento de lixiviados (PTL), osmosis inversa, impacto ambiental, recurso hídrico.

ABSTRACT

This study reviews the current status in the treatment of leachates generated in sanitary landfills in Colombia, considering the negative environmental impact generated by their discharge on water sources. A diagnosis of sanitary allowed identifying 144 of these sites in Colombian territory. Using a filter of parameters such as number of inhabitants, number of tons of waste generated, and flow of leachates generated, 17 landfills were selected as object of study. According to current regulations and the latest characterizations carried out by control entities, it was found that all these 17 landfills are above the permissible limits for leachates dumping, thus negatively affect some bodies of water with highly toxic pollutants such as cadmium, chromium, lead, bromine, zinc, and mercury, which cannot be eliminated naturally, causing bioaccumulation and environmental catastrophes. Therefore, the most efficient treatments for the removal of this type of pollutants used in Colombia were compared based on the physicochemical parameters of each of the 17 sites studied. As a consequence, reverse osmosis was identified as the treatment with higher efficiency. However, pretreatments are suggested throughout the sanitary landfill system. In addition, it was also determined that the Magdalena River is the most affected body of water in the country, since 5 landfills discharge its leachates in their waters.

Keywords: Leachate, leachate treatment plant (LTP), reverse osmosis, environmental impact, water resources.

INTRODUCCIÓN

Los niveles de contaminación reportados en Colombia han crecido notablemente durante los últimos años, particularmente en lo que concierne a la afectación de la calidad del agua, la cual manifiesta la presencia de contaminantes de material biodegradable, no biodegradable, nutrientes, metales pesados y mercurio (IDEAM, 2014). Este fenómeno es provocado por diferentes actividades antrópicas.

Sin embargo, la mayor fuente contaminante está dada por las grandes descargas de lixiviados que generan diariamente los rellenos sanitarios (en adelante RESA), situación que amenaza la sostenibilidad del recurso hídrico y pone en riesgo la salud de la población. Según información del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), “los lixiviados son líquidos altamente contaminados, producto de la perco-

lación de agua a través de los residuos en proceso de degradación” (Decreto 1713 de 2002).

En consecuencia, el vertimiento de lixiviados genera grandes impactos, tales como el desabastecimiento de la oferta hídrica disponible, esencial para mantener y conservar los ecosistemas fluviales y las necesidades de los usuarios (IDEAM, 2014). Por otro lado, se cuenta también como impacto la reducción del caudal ambiental, el cual, según el MADS (2010), es el caudal hídrico mínimo necesario para la supervivencia de los ecosistemas; además de considerar que “el acceso al agua potable es fundamental para la salud, es uno de los derechos humanos básicos y un componente de las políticas eficaces de protección de la salud” (OMS, 2011).

En relación con la calidad del agua de los ríos de Colombia, se evidencia que esta se ve afectada por la

cantidad de fuentes contaminantes conectadas con los cuerpos de agua. Al respecto, una de las principales fuentes de contaminación es el vertimiento de los lixiviados generados por los rellenos sanitarios, los cuales no cuentan con la capacidad necesaria para tratar la cantidad generada de dichos componentes. Por consiguiente, para determinar la calidad del agua y el cumplimiento con los límites máximos permisibles en sus componentes, impuestos por la ley, es necesario realizar un diagnóstico del tratamiento previo realizado al efluente. Para ello, se tienen en cuenta factores como el caudal tratado, el tipo y la configuración del tren de tratamiento, su localización y la tecnología que utiliza para su funcionamiento. Lo anterior tiene como objetivo llevar a cabo un análisis inicial de las plantas de tratamiento de lixiviados (PTL) que poseen la mayoría de los RESA.

A partir de lo anterior, resulta necesario identificar los factores que influyen en el funcionamiento de las PTL. Se puede inferir que la variabilidad climática es uno de estos factores. Parámetros como temperatura, altura, presión atmosférica, evapotranspiración y precipitación influyen en el proceso físico, químico o biológico que realizan las plantas, puesto que contribuyen a incrementar la cantidad del lixiviado producido.

Como consecuencia de la descarga del lixiviado sin tratamiento, se evidencia impacto por contaminación de los cuerpos hídricos receptores, tanto superficiales como subterráneos (ríos, lagos, quebradas secas), una de las problemáticas actuales que mayores impactos negativos genera a escala global, amenazando la sostenibilidad del recurso hídrico y poniendo en riesgo la salud de la población. Teniendo en cuenta esta problemática, se hace necesario realizar un análisis comparativo del lixiviado generado en los principales RESA en Colombia, tal como pretende esta investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recopilación de información preliminar

Rellenos sanitarios en Colombia

Colombia es un país con una superficie total de 2.070.408 km², distribuidos en un área continental de 1.141.748 km² y un área marítima de 928.660 km² (IGAC, 2018). En términos de cantidad de agua que fluye por unidad de área en la nación, el país cuenta con

el doble del rendimiento promedio de Latinoamérica, estimado en 21 l/s-km² (IDEAM, 2014). Colombia se encuentra dividida en 5 regiones naturales y en 32 departamentos, en el ámbito administrativo. En estos 32 departamentos se dispone aproximadamente de 11,6 toneladas de residuos sólidos (RS) (MAVDT, 2016), los cuales son producidos diariamente por 41.468.384 habitantes (DANE, 2005).

De acuerdo con información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios), el país cuenta con 144 rellenos sanitarios autorizados para la disposición de RS. La figura 1 ilustra la ubicación geográfica de RESA en Colombia (Superservicios, 2017), los cuales se encuentran agrupados en determinadas regiones, por lo que, según la Superservicios, algunas zonas del país carecen de este servicio. Teniendo en cuenta lo anterior, en la figura 2 se presenta el porcentaje de RESA en Colombia por regiones naturales; información recopilada a partir de datos recuperados de la Superservicios (2017). Los RESA en Colombia se encuentran ubicados principalmente en la región Andina (66,9 %), seguida de la región Caribe (11,5 %), Orinoquía (8,10 %), Pacífica (8,10 %) y Amazonía (4,7 %). Por su parte, la figura 3 da cuenta de la cantidad de RS generados en cada una de estas regiones del país.

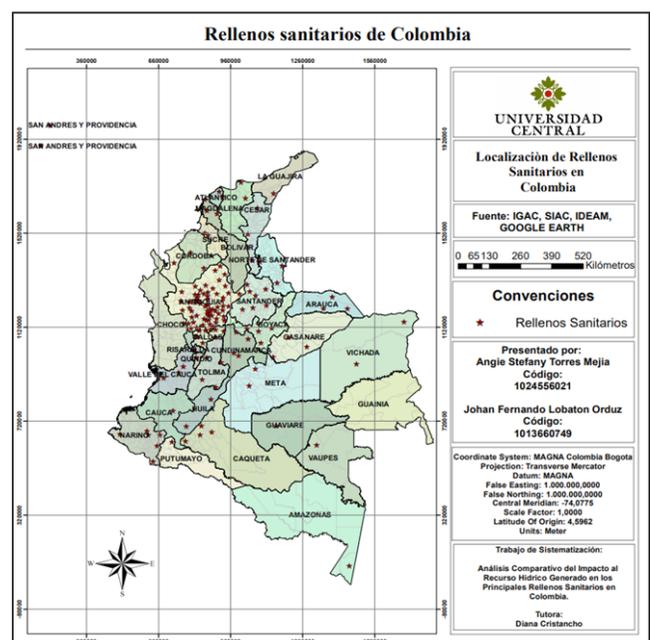


Figura 1. Ubicación geográfica de RESA en Colombia

Fuente: autores con información de IGAC, SIAC, IDEAM y Google EARTH.

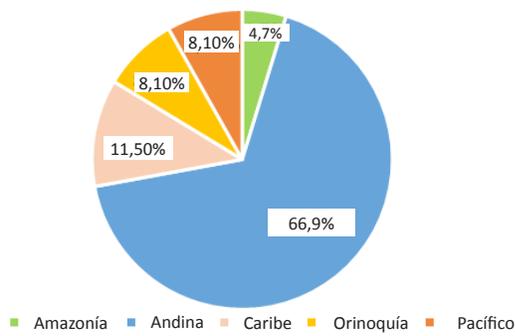


Figura 2. Distribución de RESA por región natural de Colombia
Fuente: elaboración propia.

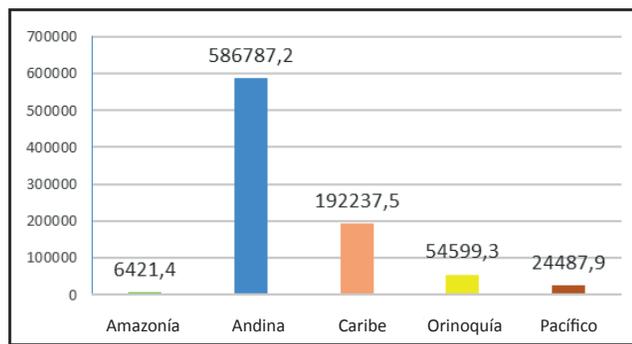


Figura 3. Volumen de RS generados en las regiones naturales de Colombia (toneladas)
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Variables de los parámetros según el tipo de lixiviado

Parámetro	Lixiviado joven <5 años	Lixiviados intermedio 5-10 años	Lixiviado viejo >10 años
PH	8,26	8,5	9,58
DQO (mg/1)	25455	6638	2197
DBO	13391	1594	165
ST	33796	17950	9345
NH	1090	787	257
Agentes incrustantes (Fe, Ca, Mg)	Muy altos	Medio	Bajos
Detergentes	Muy altos	Medio	Bajos
Metales pesados	Muy altos	Medio	Bajos

Fuente: autores con información de Giraldo (2001) y Torres et al. (2014).

Depuración y clasificación de la información recolectada

Gracias a la información recolectada a través de fuentes bibliográficas, licitaciones, trabajos de grado y en-

Generación de lixiviados en los RESA de Colombia

Los lixiviados contienen altas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos, dentro de los que se cuentan ácidos húmicos, nutrientes y metales pesados (MP) como zinc, arsénico, cadmio, níquel, cobre, plomo, aluminio, estaño, selenio y mercurio, entre otros (Cristancho-Montenegro, 2013), además de sales inorgánicas y agentes infecciosos (Hernández-Berriel et al., Lugo, 2012). No obstante, las características fisicoquímicas de estos residuos líquidos varían de un lugar a otro, lo que hace necesario llevar a cabo estudios para cada caso particular (Álvarez-Contreras & Suárez-Gálvez, 2006). La generación de lixiviados y una mala operación en los RESA conducen a la emisión de olores desagradables y gases contaminantes, en especial metano; por ende la contaminación al recurso hídrico por efecto de este vertimiento y un manejo deficiente de la cobertura de los residuos sólidos, la cual, a su vez, aumenta la generación de este líquido residual (Noguera & Olivero, 2010). La tabla 1 resume los principales parámetros de los lixiviados de un RESA de acuerdo con información suministrada en el trabajo de Giraldo (2001).

tidades reguladoras de cada departamento fue posible seleccionar los principales RESA de Colombia. Para tal fin, se realizó un filtro en tres pautas: (i) el número de habitantes de los municipios que disponen sus residuos sólidos en RESA, según su licencia ambiental;

(ii) la cantidad de toneladas mensuales recibidas por cada RESA; y (iii) el caudal de lixiviado generado. Teniendo en cuenta que el caudal oscila por efecto de la incidencia de factores climáticos, se dio mayor peso a las variables número de habitantes y toneladas generadas, puesto que estas no fluctúan de manera drástica en el tiempo. Esta información se relaciona en las tablas 2, 3 y 4.

Paso seguido, con base en las variables habitantes y toneladas, las cuales son las de mayor peso (toneladas dispuestas mensualmente y número de habitantes que disponen los residuos), se procedió a seleccionar los RESA más representativos del país, considerando que pueden ser también los que mayor impacto podrían estar generando. Por ende, se continuó realizando la comparación de los tres parámetros: número de habitantes, toneladas y caudal.

Tabla 2. Número de habitantes de Colombia por región

Habitantes (Hab)	Número de rellenos sanitarios en las regiones de Colombia				
	Amazonía	Pacífico	Orinoquía	Andina	Caribe
500 a 5000	1	3	2	8	0
5001 a 10000	0	2	2	20	0
10001 a 20000	3	1	1	18	2
20001 a 50000	1	1	1	26	0
50001 a 100000	1	0	4	3	2
100001 a 1000000	1	3	7	3	16
1000000 a 7000000	0	0	4	0	8

Fuente: elaboración propia con información de Municipios Colombia (2019).

Tabla 3. Toneladas de residuos por mes generadas en Colombia por región

Toneladas (Ton/mes)	Residuos dispuestos en los RESA en Colombia				
	Andina	Pacífica	Orinoquía	Amazonía	Caribe
5 a 100	34	5	3	1	3
101 a 200	16	0	1	1	0
201 a 500	12	1	3	3	2
501 a 1000	13	0	1	0	0
1001 a 10000	12	5	2	2	5
10001 a 50000	0	0	6	2	10
50001 a 200000	3	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia con información de Superservicios (2017).

Con la información en la tabla 4 se puede evidenciar los caudales promedio de lixiviado generado en las regiones naturales en Colombia, los cuales van desde 0,004 hasta 2 l/s. Es pertinente mencionar que dicho caudal puede variar en función de las precipitaciones hídricas y la temperatura, teniendo en cuenta que estas variables pueden modificar las características fisicoquímicas y biológicas del lixiviado (Segovia Aseo, 2013).

Tratamiento de lixiviados en Colombia

En Colombia se manejan diferentes tipos de tratamientos para los lixiviados con el objetivo de disminuir las concentraciones de sus contaminantes, dar cumplimiento a la normatividad vigente y reducir sus impactos sobre recurso hídrico. Los diferentes tratamientos que se emplean en los RESA de Colombia se reflejan en la figura 4.

Tabla 4. Caudal de lixiviado generado en las Regiones en Colombia

Q (l/s)	Rellenos sanitarios				
	Andina	Pacífica	Orinoquía	Amazonía	Caribe
0 a 0,0049	40	6	4	1	4
0,005 a 0,009	13	0	2	1	0
0,01 a 0,19	12	1	1	1	3
0,2 a 0,9	13	1	2	0	0
1 a 2	11	1	2	1	4
2,1 a 5	5	0	0	2	4
5,1 a 7,5	1	1	1	1	1
7,6 a 12,5	2	0	0	0	1

Fuente: elaboración propia con información de Superservicios (2017).

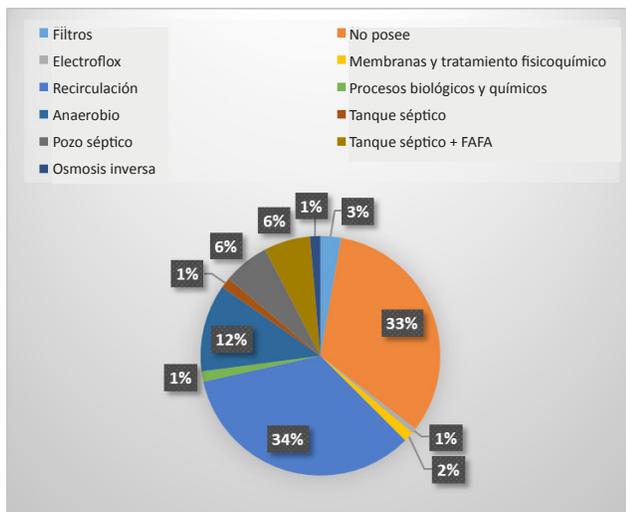


Figura 4. Tipos de tratamientos de lixiviados en los RESA de Colombia y su porcentaje de aplicación

Fuente: elaboración propia con información de Superservicios (2017).

DIAGNÓSTICO DE LOS RELLENOS SANITARIOS EN COLOMBIA

Rellenos sanitarios seleccionados para evaluación

Los RESA más representativos del territorio nacional, según se consideró en este estudio, pertenecen a las principales ciudades del país, en las cuales se cuenta con un mayor número de habitantes que disponen de residuos sólidos. Por ende, estos RESA reciben una mayor cantidad de toneladas de residuos por mes y generan un volumen significativo de caudal de lixiviados, el cual se vierte a los recursos hídricos, como se evidencia en la tabla 5.

Tabla 5. Principales RESA en Colombia

Relleno Sanitario	Ciudad y departamento	Habitantes	Toneladas (t/mes)	Caudal (Q)
Doña Juana	Bogotá, Cundinamarca	6.838.212	188.384	8,9
Parque Ambiental La Pradera	Medellín, Antioquia	3.707.584	79.469	3,87
El Guabal	Cali, Valle del Cauca	3.004.440	70.543	0,003
Los Pocitos	Barranquilla, Atlántico	1.255.827	47.432	12
Parque Ambiental Loma de los Cocos	Cartagena, Bolívar	1.257.419	45.106	1
Nuevo Mondoñedo	Mosquera, Cundinamarca	1.743.624	40.692	0,9
El Carrasco	Bucaramanga, Santander	1.135.608	30.875	2,5
Guayabal	Cúcuta, Norte de Santander	868.122	25.257	0,7
El Clavo	Palmar de Varela, Atlántico	832.776	23.742	1,06
Regional Presidente	San Pedro, Antioquia	3.355.652	22.341	3,72

(Viene página anterior)

Relleno Sanitario	Ciudad y departamento	Habitantes	Toneladas (t/mes)	Caudal (Q)
La Esmeralda	Manizales, Caldas	755.049	19.006	2,2
La Glorita	Pereira, Risaralda	1.075.218	18.000	8
Parque Ecológico Reciclante	Villavicencio, Meta	603.384	16.091	5
Loma Grande	Montería, Córdoba	1.447.883	15.182	3,67
Los Ángeles	Neiva, Huila	730.396	12.881	0,13
Antanas	Pasto, Nariño	916.306	12.300	1
Praderas del Magdalena	Girardot, Cundinamarca	758.288	12.043	1

Fuente: elaboración propia con información del DANE (2005).

La mayoría de los RESA a evaluar se encuentran ubicados en la región andina del país debido a que allí se concentran importantes ciudades y la mayor parte de las actividades económicas, producto del acceso a vías. La concentración de los sistemas de recolección de basuras en esta región ocasiona una mayor generación de residuos sólidos en comparación con otras zonas del país, como se evidencia en la figura 5.

Habitantes, toneladas y caudal generado

Estos RESA cuentan con una cantidad representativa de habitantes que depositan sus residuos en ellos, por ende, generan mayor número de toneladas de residuos sólidos al mes. La figura 6 presenta la cantidad de habitantes que disponen sus RS en los RESA evaluados. Estos valores tienen amplias variaciones en algunos casos, en especial los rellenos Doña Juana, La Pradera, Regional Presidente y El Guabal, donde la

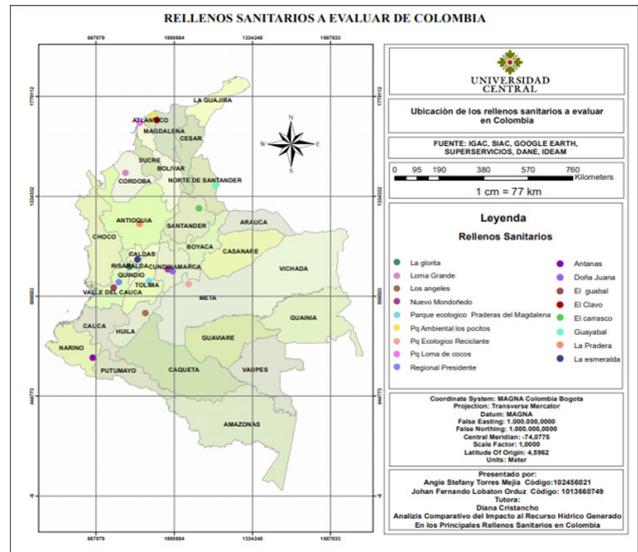


Figura 5. Ubicación de los 17 RESA principales de Colombia

Fuente: elaboración propia con información de IGAC, SIAC, IDEAM Y Google EARTH.

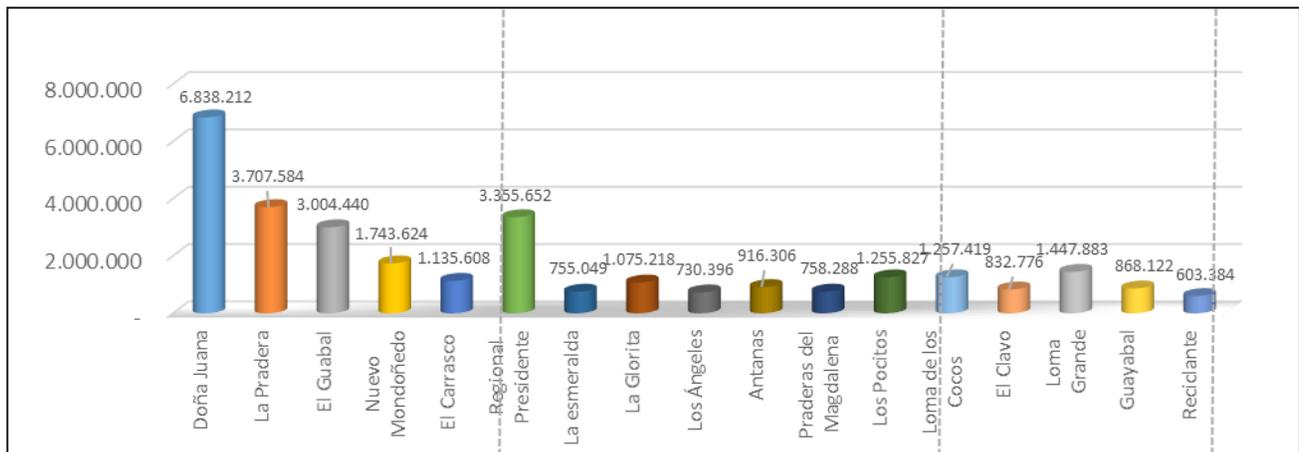


Figura 6. Número de usuarios de los RESA a estudiar

Fuente: elaboración propia con información de Municipios Colombia (2019).

mayoría de los habitantes de Colombia disponen sus residuos debido a la cercanía de estos RESA con las ciudades con mayores rangos de población.

En la figura 7 se observa que en el RESA Doña Juana se disponen 188.384 t/mes de RS, un valor significativo en comparación con los demás RESA. Así mismo, los rellenos La Pradera y el Guabal reciben gran cantidad de residuos sólidos al mes, lo que ocasiona la gene-

ración de un gran volumen de lixiviados. La figura 8 permite observar el volumen del caudal del lixiviado (l/s) generado en cada RESA, evidenciando que la mayor generación del líquido se da en los rellenos Los Pocitos, La Glorita y Doña Juana, superando la cifra de 8 l/s; este valor puede variar de acuerdo con las condiciones climáticas y diversos factores que afectan la generación del lixiviado.

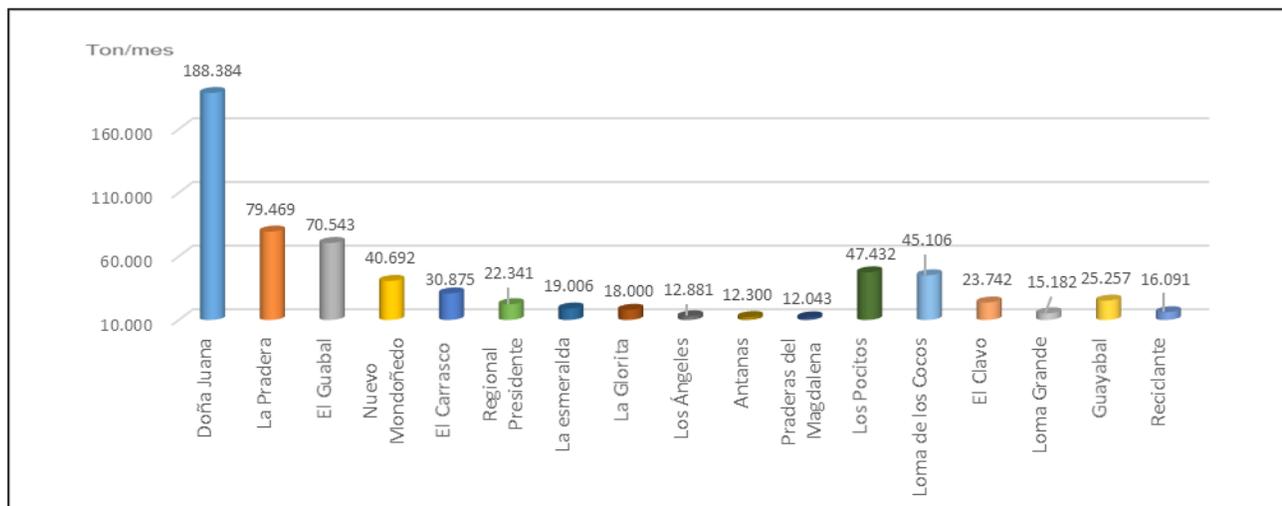


Figura 7. Toneladas de residuos que ingresan a los RESA a evaluar
Fuente: elaboración propia con información de Superservicios (2017).

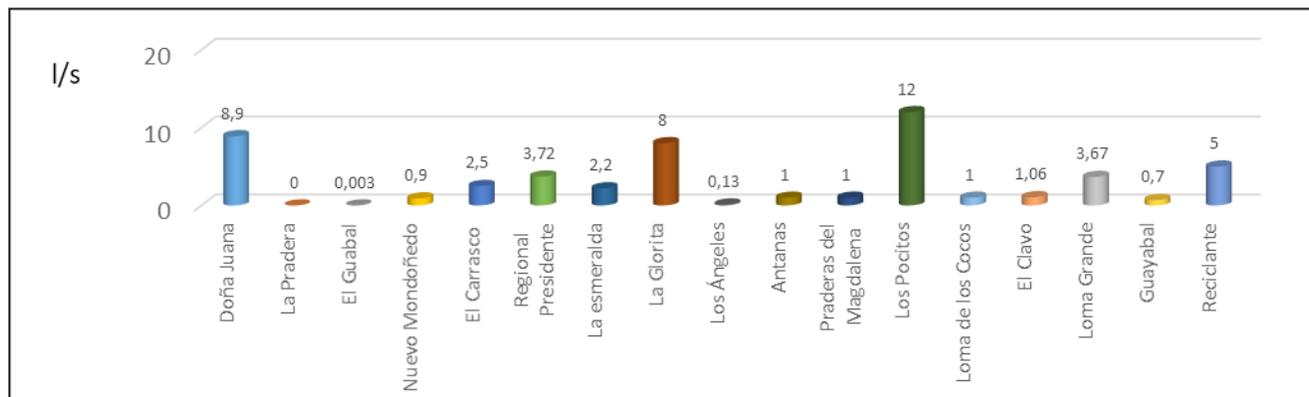


Figura 8. Caudal (Q) de lixiviados de los RESA a evaluar
Fuente: elaboración propia con información de Superservicios (2017).

Tratamiento de lixiviados a evaluar en los 17 RESA seleccionados

De acuerdo con la información recopilada en este trabajo, en los 17 rellenos seleccionados predominan los tratamientos de tipo anaerobio y la recirculación, como se muestra en la tabla 6.

Teniendo en cuenta la información en la tabla 6, se aclara que algunos RESA generan poco caudal de lixiviados por la cantidad de residuos sólidos para disponer, entre otros factores, por lo cual, según la operación del relleno, se utiliza el proceso de recirculación de residuos sólidos en la misma zona de disposición. Esta actividad transforma al RESA en un

Tabla 6. Tratamiento de lixiviados utilizado en los rellenos a estudiar

Tratamiento de lixiviado	Rellenos sanitarios
Anaerobio	Doña Juana
	Los Pocitos
	El Carrasco
	La Esmeralda
	Parque Ecológico Reciclante
	Antanas
Electroflor UV	Regional Presidente
Osmosis inversa	Nuevo Mondoñedo
	El Guabal
No posee	La Glorita
Procesos biológicos y químicos (aerobio)	Parque Ambiental La Pradera
Recirculación	Parque Ambiental Loma de los Cocos
	Guayabal
	El Clavo
	Loma Grande
	Los Ángeles
	Parque Ecológico Praderas del Magdalena

Fuente: elaboración propia.

biorreactor para tratar el efluente, reduciendo significativamente tanto el DBO como los metales pesados. No obstante, este proceso tiene desventajas, tales como la desestabilización del terreno, la acumulación de lixiviados y el aumento de la generación de biogás, para lo cual se tienen que tomar medidas adicionales; por ejemplo, el control del caudal y chimeneas (López-Vega, 2017). Vale la pena mencionar que en algunos rellenos (como Doña Juana) está totalmente prohibido realizar esta actividad debido al evento de deslizamiento que ocurrió en 1997 en el RESA Doña Juana, en la ciudad de Bogotá, y en función de la licencia ambiental que opere. De modo que para este estudio se descartarán los RESA que realizan recirculación, puesto que no generan impacto al recurso hídrico por no realizar vertimiento. A partir de lo anterior, solo se estudiarán los rellenos los Ángeles y

Guayabal debido a que cuentan con laguna de evaporación como pretratamiento adicional.

CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS QUE SE DISPONEN EN LOS RESA

Residuos sólidos

Los RESA reciben diariamente residuos sólidos, los cuales se consideran “como cualquier objeto, material, sustancia o elemento, principalmente sólido, resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador presenta para su recolección por parte de la empresa prestadora del servicio público de aseo” (SIAC, 2013).

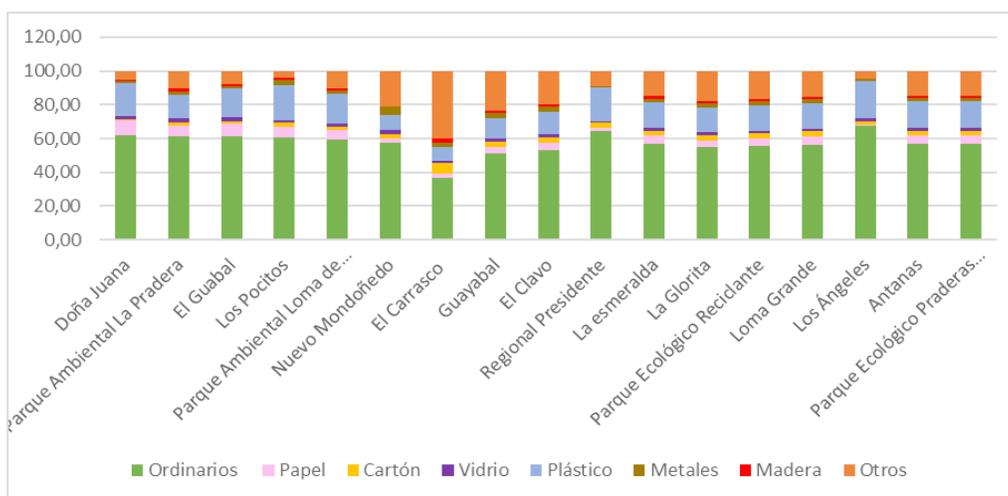


Figura 9. Porcentaje de RS dispuestos en los RESA a evaluar
Fuente: elaboración propia.

Factores ambientales que influyen en los lixiviados

Temperatura

Es primordial tener en cuenta la temperatura en el área de localización del lixiviado, puesto que esta afectará su generación. En la figura 10 se puede apreciar que de los 17 RESA la zona que presenta mayor temperatura es el departamento del Atlántico, donde

se encuentra ubicado el relleno Los Pocitos, y la ciudad de Cartagena, donde se sitúa el Parque Ambiental Loma Grande.

Precipitación

Debido a que un aumento o una disminución en la precipitación afecta la cantidad de lixiviado generado, se realizó un mapa de este elemento en el territorio nacional y los puntos de localización de los RESA. En la figura 11 se puede evidenciar la precipitación anual total, identificando que el RESA La Pradera se encuentra en una zona que tienen intervalos altos de precipitación. De igual modo, en la parte central del país se observa que la mayoría de los RESA cuenta con niveles similares de precipitación.

Impacto al recurso hídrico por el vertimiento de lixiviado

El Estudio Nacional del Agua realizado en 2014 dividió el área total del país en cinco regiones hidrográficas. Este trabajo señala que la oferta hídrica que abastece las cabeceras municipales se encuentra vulnerable al desabastecimiento (IDEAM, 2014). Así mismo, permite observar un deterioro en la calidad del recurso debido a vertimientos domésticos e industriales en las zonas aledañas a los principales RESA de Colombia, con lo cual se generan impactos ocasionados por el vertimiento de los lixiviados provenientes de tales vertimientos. En la figura 12 se puede apreciar que los ríos

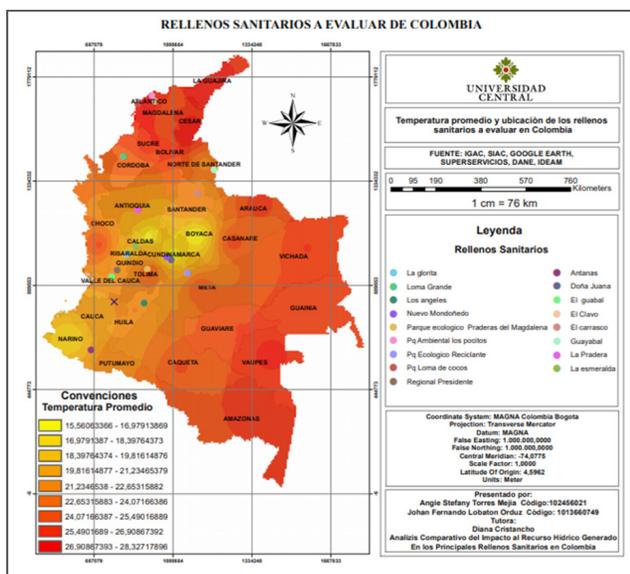


Figura 10. Mapa de temperatura promedio y ubicación de los RESA evaluados
Fuente: elaboración propia con información de:IGAC, SIAC, IDEAM Y Google EARTH.

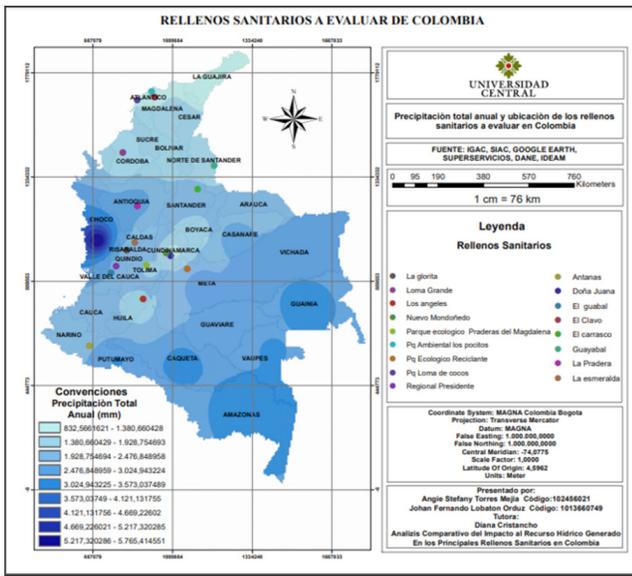


Figura 11. Mapa de precipitación anual y ubicación geográfica de los RESA evaluados
 Fuente: elaboración propia con información de IGAC, SIAC, IDEAM Y Google EARTH.

Cauca y Magdalena son los efluentes más afectados por los RESA, situación que deriva de su cercanía con los afluentes de estos cuerpos de agua.

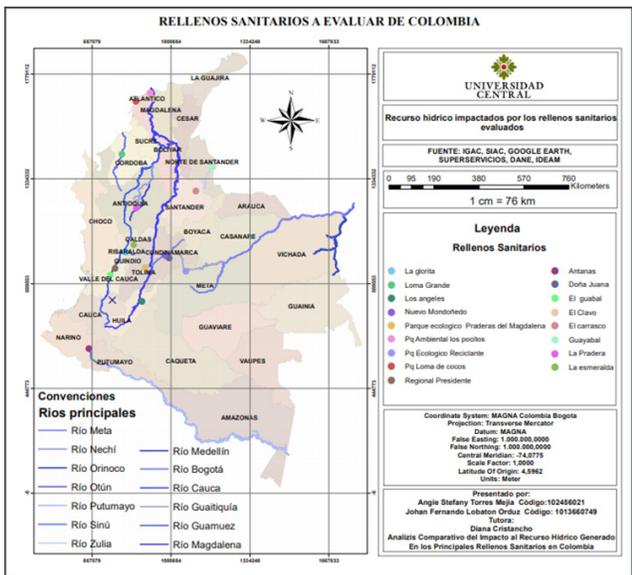


Figura 12. Mapa del recurso hídrico impactado por los RESA evaluados
 Fuente: autores con información de: IGAC, SIAC, IDEAM Y Google EARTH.

ANÁLISIS DE LOS 17 RESA EVALUADOS

Con relación a los 17 RESA evaluados, se realizó un análisis para identificar las tecnologías utilizadas en el tratamiento de sus lixiviados, evaluando tanto el cumplimiento a nivel normativo como los impactos a nivel hídrico que generan en la actualidad. Finalmente, se evaluó y planteó la mejor alternativa para el tratamiento de lixiviados en Colombia, buscando así minimizar el impacto potencial de estos residuos al recurso hídrico.

Normatividad

El lixiviado presenta características que aumentan notablemente su toxicidad y dificultan su tratamiento: DQO, DBO, nitrógenos, sólidos suspendidos, pH y la presencia abundante de sustancias tóxicas como metales pesados, entre ellos, cadmio, cromo, hierro, plomo y mercurio. A fin de identificar el estado del lixiviado generado en cada RESA evaluado, comparamos los parámetros de su última caracterización con la normatividad aplicable para vertimientos de lixiviados en Colombia, es decir, la Resolución 631 del 17 de marzo de 2015 y la Resolución 1074 de 1997 del DAMA. De esta manera, fue posible determinar el cumplimiento de los límites máximos permisibles.

Con respecto a los principales contaminantes, encontramos los metales pesados, que son, en general, perjudiciales para el ambiente y tóxicos para los seres humanos. Por esta razón, las concentraciones permitidas en el agua de consumo humano por la legislación vigente son muy pequeñas. Los principales metales pesados presentes en la caracterización del lixiviado corresponden a: cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), mercurio (Hg) y plomo (Pb) (Ferré *et al.*, Domingo, 2007). Según el análisis realizado en este trabajo, ninguno de los RESA evaluados cumple con la totalidad de los parámetros exigidos por la normatividad colombiana. Así mismo, en el caso de la Resolución 0631 de 2015, se registra que ningún RESA evaluado cumple con los parámetros establecidos; específicamente, el relleno Regional Presidente supera los límites permisibles de Pb, Cu y Ni, mientras que el RESA Carrasco supera los límites de Ni.

Por otra parte, de acuerdo con lo establecido en la Resolución 1074 de 1997, de los RESA evaluados solo El Guabal, Nuevo Mondoñedo y La Esmeralda cumplen

en su totalidad con los límites máximos permisibles. Sin embargo, nuevamente, el relleno Regional Presidente incumple dicha resolución, reportando niveles altos en metales como Cd, Cr, Ni y Pb.

Con respecto al pH, se observa que los RESA evaluados cumplen con las dos normativas aplicables y están dentro de un rango óptimo para el adecuado tratamiento de lixiviados. De esta comparación podemos afirmar que ninguno de los RESA evaluados cumple con el límite máximo permisible en parámetros de gran importancia para el tratamiento del lixiviado, tales como DQO, DBO5, sólidos suspendidos totales y Cd, Cu, Cr, Ni y Pb. Además, teniendo en cuenta las resoluciones 631 del 2015 y 1074 de 1997, se observa que la segunda norma es un poco menos estricta en su regulación.

Tecnologías

Eficiencia

Para determinar la eficiencia de las tecnologías utilizadas para el tratamiento de lixiviados en los RESA evaluados se tienen en cuenta aspectos como los parámetros de su última caracterización y los reportes bibliográficos, tras lo cual se obtienen tres grados de eficiencia: alto medio y bajo.

Los promedios de la caracterización de los 17 RESA evaluados para los parámetros, DQO, DBO, SST, nitrógeno amoniacal (NH₃) y nitrógeno (N), divididos por el tipo de tratamiento efectuado, permiten obtener una comparación directa de la eficiencia de remoción de estos parámetros para cada uno de los tratamientos implementados.¹ Esta información permite llegar a las siguientes determinaciones:

- Todos los parámetros tratados por osmosis son menores a 300 mg/l, a excepción del DQO (1.371 mg/l), los cuales, comparados con los demás, son significativamente inferiores; esto refleja la eficiencia del tratamiento en la remoción de los parámetros.
- Según los datos obtenidos, la recirculación no es efectiva en la remoción de DBO, DQO, SST y N.

1 Los parámetros NH₃, N y SST, que no se observan en los tratamientos electroflox y sin tratamiento, no se tuvieron en cuenta a causa de no encontrar registros.

- Al comparar la eficiencia, se evidencia que los tratamientos aerobio, anaerobio, la recirculación y sin tratamiento, reflejan niveles altos en DQO y SST. Así mismo, estos tratamientos superan los 4.500 mg/l en DQO.

En la tabla 7 se observan los promedios de la caracterización de los principales metales presentes en los 17 RESA evaluados, divididos por el tipo de tratamiento efectuado. Con el objetivo de comparar su eficiencia, teniendo en cuenta que estos parámetros son difíciles de remover en virtud de su toxicidad, se llega a las siguientes determinaciones:

- El níquel en los tratamientos anaerobios y electroflox están por encima de 0,5 mg/l.
- El tratamiento de electroflox no es eficiente para la remoción de estos metales, de acuerdo con los elevados promedios reportados.
- El tratamiento de osmosis inversa mantiene los metales en un intervalo de 0,001 y 0,101 mg/l, demostrando que tiene la eficiencia necesaria para tratar contaminantes.
- En los tratamientos anaerobios, electroflox y recirculación, el cromo supera el nivel de 0,101 mg/l. En contraste, en el tratamiento osmosis inversa está muy por debajo de este límite.

En definitiva, escoger el tipo de tecnología para determinado tratamiento depende de las características del lixiviado y de los requerimientos normativos de cada población (Giraldo & Soler, 2008).

Afectación del lixiviado según la edad

Los valores obtenidos pueden sufrir variaciones debido al tiempo de apertura del relleno y la cantidad de toneladas depositadas en él. Esta relación es de suma importancia en la definición del sistema de tratamiento a seguir para la depuración de estos líquidos. Así, para lixiviados jóvenes, como primera etapa de tratamiento siempre será recomendable pensar en sistemas biológicos, mientras que para un lixiviado viejo, dada su baja biodegradabilidad, los procesos físico-químicos se convierten en la mejor opción (Nájera-Aguilar, 2007).

Tabla 7. Eficiencia de los tratamientos para el lixiviado

Problemática	Aerobio	Anaerobio	Recirculación	Osmosis	Electrolux
DBO	Altos	Bajos	Bajos	Altos	Altos
DQO	Bajos	Bajos	Bajos	Altos	Altos
Nutrientes	Medio	Bajos	Bajos	Medio	Medio
Metales	Medio	Altos	Medio	Altos	Bajos
Patógenos	Bajos	Medio	Bajos	Bajos	Bajos

Nota: la tabla se obtuvo con base en la bibliografía relacionada y con los datos de las figuras anteriores, en donde se determinó la eficiencia para la remoción de cada parámetro según este estudio.

Fuente: elaboración propia con información de Salazar-Gómez y Saavedra-Antolínez (2009).

Tabla 8. Vida útil de los rellenos a estudiar

Rellenos sanitarios	Inicio	Vita útil	Operación
Doña Juana	1988	2022	31
Parque Ambiental La Pradera	2003	2027	16
El Guabal	2008	2018	11
Los Pocitos	2009	2039	10
Parque Ambiental Loma de los Cocos	2006	2025	13
Nuevo Mondoñedo	2005	2029	14
El Carrasco	1978	2020	41
Guayabal	2001	2025	18
El Clavo	2009	2040	10
Regional Presidente	1998	2046	21
La Esmeralda	1999	2023	20
La Glorita	2007	2025	12
Parque Ecológico Reciclante	2002	2040	17
Loma Grande	2010	2033	9
Los Ángeles	2003	2035	16
Antanas	2001	2033	18
Parque Ecológico Praderas del Magdalena	2005	2025	14

Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos en la tabla 8, se puede observar que los RESA El Guabal y El Carrasco están próximos al final de su vida útil para la disposición final de residuos en la zona licenciada. De igual manera, se puede evidenciar que los RESA evaluados tienen un tiempo de operación mayor a 10 años, lo que facilita el tratamiento de sus lixiviados gracias a que las concentraciones de contaminantes han disminuido durante este período.

Influencia en el lixiviado de los 17 RESA por los factores ambientales

Temperatura

La temperatura del área de ubicación de cada RESA es primordial debido a que a mayor temperatura será más rápida la degradación de la materia orgánica, lo

que produce un caudal superior de lixiviados. Como se observa en la figura 10, únicamente los RESA Los Pocitos, Regional Presidente y Loma Grande se encuentran ubicados en zonas de temperaturas superiores a 25 °C. Los demás RESA se encuentran en zonas tropicales donde la temperatura promedio es de 20 °C, lo que facilita el tratamiento, teniendo en cuenta que esta temperatura es favorable para el adecuado desarrollo de los procesos anaerobios (Barba *et al.*, 2010).

Precipitación

Las variaciones en el caudal del lixiviado a tratar están asociadas con la cantidad de lluvia. En este caso particular, observamos que los RESA evaluados se encuentran ubicados en zonas de precipitación de 1.500 a 2.000 mm anuales (rango medio-bajo), lo que beneficia el tratamiento de los RESA debido a que si estos cuentan con un recubrimiento diario tendrán un caudal casi fijo, sin tantas oscilaciones.

Impactos al recurso hídrico

El agua es de vital importancia para la existencia de la vida en el planeta. Al mismo tiempo, el recurso hí-

drico tiene grandes repercusiones en las industrias, el desarrollo económico, la seguridad energética y el transporte. Su reducción o la pérdida de su calidad podrían generar graves dificultades en términos económicos, sociales, políticos, ambientales y de salud pública (Otálora-Gómez *et al.*, 2011). Por tal motivo, en el presente trabajo se reseña el impacto ambiental generado como consecuencia del tratamiento de lixiviados provenientes de RESA que son vertidos en las fuentes hídricas.

Fuentes hídricas afectadas

Usualmente se considera el tipo y el nivel de tratamiento alcanzado al momento de verter el efluente del sistema de tratamiento de lixiviados en los cuerpos de agua, tanto subterránea como superficial, para lo cual es necesario contar con un permiso de vertimiento que condiciona los requisitos y límites máximos permisibles de los parámetros del líquido (MAVDT, 2005). En la tabla 9 se puede observar cuáles de los 17 RESA evaluados cuentan con permiso de vertimiento, cuáles realizan vertimiento y cuál es su principal afluente.

Tabla 9. Vertimientos de los RESA evaluados

RESA	Permiso de vertimiento	Vertimiento	Caudal (Q)	Efluente secundario	Efluente primario	Fuente hídrica principal
Doña Juana	En proceso	Sí	8,9	Río Tunjuelo	Río Bogotá	Río Magdalena
Parque Ambiental	No	Sí	3,87	Río Medellín	Río Nechí	Río Cauca
El Guabal	Sí	Sí	0	Río Jamundí	Río Cauca	Río Magdalena
Los Pocitos	Sí	Sí	12	Río Malambo	-	Río Magdalena
Nuevo Mondoñedo	No	No	0,9	Río Chicamocha	Río Bogotá	Río Magdalena
El Carrasco	Sí	Sí	2,5	Aguas subterráneas	-	-
Guayabal	No	No	0,7	-	-	Río Zulia
Regional Presidente	Sí	No	3,7	-	-	Río Cauca
La Esmeralda	Sí	Sí	2,2	Quebrada Aguas Frías	-	Río Cauca
La Glorita	Sí	Sí	8	Quebrada La Suecia	Río Otún	Río Cauca
Parque Ecológico Reciclante	Sí	Sí	5	Río Guataquí	Río Meta	Río Orinoco
Los Ángeles	No	No	0,1	-	-	Río Magdalena
Antanas	Sí	Sí	1	Río Guamúz	Río Putumayo	Río Amazonas

Fuente: elaboración propia con información de PGIRS municipales.

Como se evidencia en la tabla 9, los RESA Nuevo Mondoñedo, Guayabal y Los Ángeles no cuentan con permiso de vertimiento. Sin embargo, es de aclarar que no lo requieren debido a que en ellos se realiza la recirculación del lixiviado, evitando que el líquido llegue a las fuentes hídricas. De otro lado, existen casos particulares, como el RESA La Pradera, donde se realiza

vertimiento del lixiviado y no se reporta permiso de vertimientos. De acuerdo con la información analizada en esta investigación, los ríos Magdalena, Orinoco, Cauca y Amazonas son los principales afluentes de los lixiviados vertidos por los RESA evaluados; algunas de sus principales características se presentan en la tabla 9.

Tabla 10. Recurso hídrico impactado por los 17 RESA evaluados

Río	Caudal (m ³ /s)	Longitud (km)	Superficie (Km ²)	Efluente	Importancia
Magdalena	7.200	1.558	226.562	Mar Caribe	Río interandino más largo de toda Sudamérica
					Gran vía fluvial y fuente hidroeléctrica
					Patrón principal de la economía del país
					Práctica de pesca
Cauca	3000	1350	63.300	Río Magdalena	1290 km. son navegables
					Utilizado para diversas actividades productivas: agricultura, explotación minera, y generación de electricidad
Orinoco	33000	2.140	345.520	Río Guaviare	Es el cuarto río sudamericano más largo
					Hábitat de gran cantidad de especies
					Tiene la Hidroeléctrica Simón Bolívar, la tercera más grande del mundo.
					Tercer río más caudaloso del mundo
Amazonas	180000	6800	7050000	Océano Atlántico	Es el río más largo del mundo
					Río más caudaloso del mundo
					Riega una vasta región
					Soporta miles de especies de seres vivos

Fuente: elaboración propia con información del ENA2014 (IDEAM, 2014).

Como se observa en la figura 12, el Río Magdalena destaca por su importancia en actividades productivas como la agricultura, explotación minera, generación eléctrica y, sobre todo, porque en este cuerpo de agua se vierten 5 de los RESA evaluados en este estudio. La contaminación en las aguas del país afecta a cerca de 17,5 millones de personas que se encuentran ubicadas en las regiones aledañas a los ríos Magdalena y Cauca y el Caribe colombiano, en las cuales se reportan 756.945 toneladas de materia orgánica provenientes de las grandes zonas urbanas del país que son depositadas en los RESA que reciben mayor cantidad de toneladas por mes. Esta situación afecta el Índice de Riesgo de Calidad de Agua (IRCA), el cual determina

si el agua es apta para el consumo humano, teniendo en cuenta que estos importantes efluentes son utilizados para sistemas de riego y el consumo doméstico (Puentes, 2017).

A partir de lo anterior, se explica por qué el Río Magdalena es considerado como el río con mayores niveles de contaminación en Colombia, según datos reportados por entes de control, hecho que genera grandes impactos al recurso hídrico nacional, pues el Magdalena es uno de los cuerpos de agua más importantes del país al ser el río interandino más largo del mundo, una de la grandes vías fluviales colombianas, albergar fuentes hidroeléctricas, servir de sustento para el

consumo humano y la pesca, alojar el 53 % de los embalses del país en sus cuencas alta y media, contener 38 % de los puntos de agua subterránea y concentrar 55,8 % de la demanda hídrica nacional para la agricultura (cuenca Magdalena-Cauca) (SDA, 2018).

Contaminantes que impactan al recurso hídrico

Existen metales necesarios para la vida en bajas proporciones, tales como el hierro, el manganeso, el cobre y el cinc, entre otros. De igual manera, hay otros metales que no reportan efectos beneficiosos para los seres vivos y que, por el contrario, son tóxicos (aun en pequeñas cantidades), como en el caso del mercurio, el cadmio y el plomo (Izquierdo, 1988). Con base en el porcentaje de incumplimiento de los lixiviados en comparación con la norma, se puede observar los metales que no están dentro de los parámetros estipulados, los cuales se describen a continuación.

Cadmio

Su exposición puede generar anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos, pérdida de peso y apetito, cáncer de próstata y pulmón. Por otro lado, este elemento no es esencial para plantas y animales. Por tal motivo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, en inglés) recomienda un nivel máximo para cadmio en aguas de riego de 10 µg/L (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

Cromo

Es conocido por ocasionar varios problemas sobre la salud humana, tales como reacciones alérgicas, erupciones cutáneas, irritación y sangrado de la nariz y debilitamiento del sistema inmune, entre otros. Adicionalmente, este metal puede generar efectos negativos si las plantas lo absorben, además de ocasionar problemas respiratorios en animales (Arauzo *et al.*, 2003).

Plomo

Este elemento ocasiona afectaciones directas a diferentes órganos. En el cerebro, afecta el desarrollo y la capacidad mental de los niños. No es vital para las plantas y los animales. Además, es tóxico por ingestión y acumulativo en el cuerpo receptor (Poma, 2008).

MEJOR ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO

Al momento de elegir un tratamiento eficiente y adecuado para el manejo de lixiviados es necesario tener en cuenta características como el tiempo de producción, la efectividad de remoción de DQO y DBO y los factores que afectan la generación del lixiviado. En la tabla 11 se hace una exposición de las principales tecnologías existentes para el tratamiento de lixiviados, señalando sus ventajas y desventajas.

Sintetizando la información presentada en la tabla 11, podemos afirmar que las membranas de osmosis inversa son de alta eficiencia debido a que remueven virus, bacterias, iones divalentes y trabajan hasta presiones de 60 bares en módulos convencionales. Adicionalmente, este tratamiento es efectivo en la disminución de DQO, DBO5 y metales pesados, con una eficiencia de 66, 86, 5, 64 y 57 % frente a los sistemas anaerobios, recirculación, aerobio y electroflox, respectivamente. Sin embargo, teniendo en cuenta criterios como eficiencia, costos, mantenimiento y operación, la osmosis inversa no se presenta como la mejor alternativa debido a sus altos costos de implementación, operación y mantenimiento y una importante restricción de funcionamiento a RESA de bajos caudales.

Por lo anterior, para el tratamiento de lixiviados se sugiere la instalación de pondajes como sistema de amortiguamiento para todos los RESA que tengan un caudal superior a 3,5 l/s y alto contenido orgánico y de contaminantes tóxicos. Este tipo de sistemas pueden adecuarse como sistemas biológicos para que las PTL puedan dar cumplimiento a la norma. Cabe mencionar que este sistema es similar al que actualmente ha implementado el RESA Doña Juana como parte de su proceso de optimización.

De otro lado, se recomienda un tratamiento aerobio como el que maneja el RESA La Pradera, el cual refleja buenos porcentajes de eficiencia en comparación con los tratamientos anaerobio, recirculación y electroflox. Adicionalmente, el tratamiento aerobio reporta ventajas como bajos costos de implementación, operación y mantenimiento, simplicidad en su tecnología, alta eficiencia, baja cantidad de subproductos generados en su proceso y una menor generación de gases efecto invernadero (Bernal & Meneses, 2017).

Tabla 11. Ventajas y desventajas de los tratamientos de lixiviados

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Recirculación de lixiviados	Aumento en las tasas de producción de biogas en el RESA Menores costos	Aumentos significativos de las presiones internas de los fluidos, gas es y líquidos, que comprometan la estabilidad de los taludes. Inseguridad geotécnica Únicamente tratamiento primario Acumulación de líquidos y gases Únicamente para rellenos pequeños
Evaporación de lixiviados	Simplicidad en su tecnología Eliminación del gas Metano Costos bajos Aprovechamiento del gas	Arrastre de COVs Incrustamiento de precipitados en el sistema Formación de espumas por la turbulencia generada en el proceso de evaporación
Tratamiento conjunto con las aguas residuales	Tratamiento conjunto con agua residual	Dificultad para controlar las concentraciones de componentes orgánicos e inorgánicos Corrosión Reducción de sedimentabilidad del lodo Producción de lodo con alta concentración de metales puede inhibir la actividad biológica del lodo
Biológico Aerobio	Pos tratamientos de sistemas anaeróbicos	Costos altos Genera espumas Alta generación de lodos Altas variaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas Requieren tanques de equalización de caudales como parte del tratamiento
Biológico Anaerobio	Costos bajos-alta eficiencia Simplicidad en su tecnología Menor cantidad de lodos generados	Acumulación de materia orgánica Pretratamiento (aerobio)
Sistemas de membranas	Disminución del volumen de tanque del reactor biológico Excelentes rendimientos de esta tecnología para la remoción de la mayoría de los contaminantes DBO relativamente bajas Suprimir las necesidades de oxígeno y mantener una presión de operación constante en el proceso La separación entre biomasa y líquido depurado Los lodos concentrados retenidos se recirculan continuamente al reactor, disponiéndose en él de toda la biomasa	Aumentos significativos en la cantidad de biomasa que se tiene dentro de los reactores Costos altos Disminuciones en el flujo a través de la membrana por procesos de taponamiento Mantenimiento de este tipo de sistemas Módulos de membranas son más complicados de operar y mantener que un sedimentador
Tratamientos Físicoquímicos	Eliminación del color, contenidos en sólidos en suspensión, amonio y eliminación de algunos cationes pesados	No se obtienen buenos resultados en la eliminación de materia orgánica
Sistemas naturales	Bajos costos Tratamiento primario y terciario Eficiencia en remoción de MO Baja generación de espumas	Costo alto del terreno

Fuente: elaboración propia (2019).

CONCLUSIONES

Existen 144 rellenos sanitarios en Colombia, los cuales se encuentran ubicados principalmente en la región Andina (66,9 %), seguida de la región Caribe (11,5 %), la Orinoquía (8, 10 %), la Pacífica (8,10 %) y la Amazonía (4,7 %). Para este estudio se seleccionaron 17 RESA a partir de parámetros como número de habitantes que disponen sus RS, cantidad de toneladas recibidas y caudal de lixiviado generado. Se descartaron aquellos RESA que realizan recirculación, obteniendo como objeto de estudio un total de 11 RESA: Doña Juana, La Pradera, El Guabal, Los Pocitos, El Carrasco, Regional Presidente, La Glorita, Parque Ecológico Reciclante, Antanas, La esmeralda y Nuevo Mondoñedo.

Se identifica que los RESA objeto de estudio realizan vertimientos al recurso hídrico, impactando cuerpos de agua de gran importancia como los ríos Magdalena, Orinoco, Cauca y Amazonas. Estos vertimientos impactan a los cuerpos hídricos y a todo el ecosistema de las zonas afectadas, generando problemas en la salud humana, la fauna y la flora producto del vertimiento de metales pesados como plomo (8 %), níquel (17 %), cromo (8 %), cadmio (17 %) y cobre (8 %), los cuales contienen grandes niveles de toxicidad y generan bioacumulación en los cuerpos hídricos.

Según la normativa vigente para vertimientos puntuales a cuerpos hídricos y sistemas de alcantarillado público (Resolución 0631 del 2015; Resolución 1074 de 1997 del DAMA), los RESA El Guabal y Nuevo Mondoñedo, ubicados en zonas de temperaturas entre 16 y 21 °C, cuentan con un caudal promedio de lixiviados de 0,5 l/s y un sistema de osmosis inversa como tratamiento del lixiviado generado, con lo cual dan cumplimiento a los límites máximos permisibles. De acuerdo con lo anterior, las condiciones actuales del tratamiento de los lixiviados de estos dos RESA son adecuadas para garantizar el porcentaje de remoción de los parámetros DQO, DBO, SST y metales pesados (Cd, Cr, Cu, Hg y Pb), dado que el sistema de osmosis “filtra” partículas de hasta 0,001 μ , los sólidos disueltos en el agua pasan a través de una membrana mediante la aplicación de una fuerza que excede la presión osmótica de los componentes, eliminando el 70 % de la toxicidad existente (Roncancio-Parra, 2015).

Por su parte, los RESA Doña Juana, La Pradera, Los Pocitos, El Carrasco, Regional Presidente, La Glorita, Parque Ecológico Reciclante, Antanas y La Esmeralda,

con temperaturas entre 16 y 25 °C, reportan un caudal promedio de 4,89 l/s. Según este estudio y los datos de la caracterización reportados en los PGIRS municipales y de los entes de control, estos RESA se encuentran fuera del rango de los límites máximos permisibles impuestos. Cabe aclarar que los tratamientos de lixiviados que presentan estos RESA son: (i) sistema anaerobio (6 de ellos), el cual tiene la desventaja de generar fuertes olores y ser un proceso mucho más lento que el aerobio, además de que no cumple con la remoción de la mayoría de los contaminantes (este es implementado en los RESA más antiguos); (ii) sistema electroflox, que es un sistema de membranas a nivel experimental; y (iii) sistema aerobio, con el cual se obtienen buenos resultados en la eliminación de DQO y eficiencia en la eliminación de metales pesados.

De otro lado, se puede concluir que los RESA El Clavo, Loma de Cocos, Guayabal, Loma Grande, Praderas del Magdalena y Los Ángeles realizan recirculación, por lo tanto, no tienen vertimiento directo a los cuerpos de agua y no generan impacto ambiental. Lo anterior, con base en que su caudal promedio de 0,78l/s los convierte en los menores generadores del lixiviados, la cantidad de toneladas de RS que reciben es mucho menor que en otros RESA (22,36 t/mes) y que sus altas temperaturas (25-28 °C) conllevan a una evaporación acelerada mediante el proceso de aspersión o recirculación

Al momento de elegir la mejor tecnología para obtener un proceso óptimo en el tratamiento de lixiviados es necesario estimar las características de los RESA, las cuales varían según las condiciones climáticas y los tipos de residuos sólidos que ingresan a cada uno. A partir de estas consideraciones, se evaluaron los tratamientos del lixiviado realizados en los RESA más representativos de Colombia, lo que permitió concluir que el sistema de osmosis inversa reporta buenos rendimientos para la remoción de la mayoría de los contaminantes (en especial SST y metales pesados como Cb, Pb, Hg y Cr), como reportan los RESA Nuevo Mondoñedo y Guabal, con un cumplimiento de 100 % con relación a la normatividad. A pesar de ello, este tipo de tratamiento tiene las siguientes restricciones: opera de manera óptima con un caudal menor a 0,5 l/s y reporta altos costos de instalación, operación y mantenimiento, afectando la relación costo-beneficio, puesto que sus procesos se colmatan muy rápidamente, lo que conlleva a cambios continuos de sus

filtros, excesos en la generación de los subproductos (biomasa) y la falta de algún tipo de tratamiento de disposición final.

Por último, y teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se sugiere como mejor alternativa para tratar los lixiviados de los RESA en Colombia que los pondajes deben ser parte fundamental de los sistemas de tratamiento de lixiviados en todos los rellenos, pues estos ayudan a minimizar las carga contaminante, haciendo que esta sea fácilmente asimilada dentro de las PLT, cuyos diseños de caudal son inferiores a lo que realmente se está generando, según lo observado en los rellenos que tiene este tipo de infraestructura. Adicionalmente, se sugiere que algunos de estos pondajes sean adaptados a procesos biológicos con un grado de retención mayor, con lo cual se busca minimizar aún más este tipo de contaminantes. Para finalizar, se sugiere que, de acuerdo con las características del lixiviado de cada RESA, se implemente un proceso de afine como la nano-filtración y/o ultrafiltración, sistemas de membranas que no son tan costosos y contribuyen a remover los demás contaminantes.

Según datos reportados por entes de control, se afirma que el Río Magdalena es el más contaminado del país, lo cual puede ser ocasionado por la conexión directa que tiene con el Río Bogotá o por los vertimientos de los RESA Doña Juana, La Pradera, El Guabal, El Carrasco, La esmeralda, La Glorita y Los Ángeles, que aportan un caudal promedio de 3,8 l/s de lixiviados con un contenido de 4.126,7 mg/l DQO, 20.716 mg/l DBO, 7.216,5 mg/l SST, 0,2 mg/l Cd, 0,7 mg/l Cu, 0,88 mg/l Cr, 0,002 mg/l Hg, 1,93 md/l Ni y 0,2 mg/l Pb, los cuales superan los límites permisibles e impactan directamente al río con estas sustancias tóxicas (Procuraduría General de la Nación, 2013).

Este panorama señala como “extremadamente grave” la contaminación de la principal arteria del país, ya que este cuerpo de agua tiene una influencia directa sobre más de la mitad de los municipios colombianos, es una de las grandes vías fluviales del país, alberga fuentes hidroeléctricas y sirve de sustento para el consumo humano, la pesca y la agricultura. Además, el 53 % de los embalses del país están distribuidos en la cuenca alta y media del río, 38 % de los puntos de agua subterránea se encuentran en sus cuencas y el 55,8 % de la demanda hídrica nacional para la agricultura se concentra en la cuenca Magdalena-Cauca.

REFERENCIAS

- Álvarez-Contreras, A., & Suárez-Gelvez, J. (2006). Tratamiento biológico del lixiviado generado en el rellenosanitario “El Guayabal” de la ciudad San José de Cúcuta. *Ingeniería y Desarrollo*, 20, 95-105.
- Arauzo, M., Rivera, M., Valladolid, M., Noreña, C., & Cedenilla, O. (2003). *Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce y en los sedimentos del río Jarama*. Asociación Española de Limnología.
- Barba, L. E., Torres, P., Rodríguez Victoria, J. A., Marmolejo, L. F., & Pizarro, C. A. (2010). Influencia de la incorporación de lixiviados sobre la biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales domésticas. *Ingeniería e Investigación*, 30(1), 75-79.
- Cristancho-Montenegro, D. L. (2013). *Estimación del efecto lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana* (tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio Universidad Nacional de Colombia.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2005). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. www.dane.gov.co
- Ferré, N., Schuhmacher, M., Llobet, J., & Domingo, J. (2007). Diseño de un software para evaluar los riesgos de la exposición ambiental a través del agua, suelos y aire. *Mapfre Seguridad*, 108, 50-58.
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes*, 14, 44-55. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>
- Giraldo, E., & Soler, N. (2008). *Manejo Integrado de Lixiviados y Biogás en Rellenos*. ACODAL.
- Hernández-Berriel, M., Álvarez, N. O., Vaca, R., Márquez, L., & Lugo, J. (2012). Determinación de metales pesados en residuos sólidos y lixiviados en biorreactores a diferentes tasas de recirculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 18(sup. 1), 77-82.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. IDEAM.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2018). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. www.igac.gov.co
- Izquierdo, A. (1988). *Determinación de contaminación con cadmio en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) y su posible origen en la región de Barlovento Estado Miranda* (tesis de maestría, Universidad Central de Venezuela). Repositorio Universidad Central de Venezuela.
- Londoño-Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T., & Muñoz-García, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustria*, 14(2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- López-Vega, M. E. (2017). La recirculación de lixiviados de rellenos sanitarios en biodigestores a escala de laboratorio. *Tecnología Química*, 37(3), 433-444.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2002, agosto 6). *Decreto 1713*. Diario Oficial 44.893.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. MADS.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2005, marzo 23). *Decreto 0838*. Diario Oficial 45862.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2016). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial*. <http://www.minambiente.gov.co/>
- Municipios Colombia (2019). *Municipios Colombia*. <https://www.municipios.com.co/>
- Nájera-Aguilar, H. A. (2007). *Lixiviados, ¿Qué son, cómo se clasifican?* https://www.unicach.mx/_/ambiental/descargar/Gaceta4/Lixiviados.pdf
- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34, 347-356.
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano (cuarta edición)*. OMS.
- Otálora-Gómez, J. A., Cajiao-Cabrera, A., Ardila-Ariza, M., & Gómez-Rey, A. (2011). *Avance del derecho humano al agua*. Defensoría del Pueblo.
- Poma, P. A. (2008). Intoxicación por plomo en humanos. *Anales de la Facultad de Medicina*, 69(2), 120-126. <https://doi.org/10.15381/anales.v69i2.1155>
- Procuraduría General de la Nación (2013). *Informe de Gestión*. Procuraduría General de la Nación.
- Puentes, J. (2017, diciembre 13). Estas son las regiones con la mejor y la peor agua de Colombia. *Semana Rural*. <https://semanarural.com/web/articulo/estoss-on-las-regiones-con-la-mejor-y-la-peor-agua-de-colombia/306>
- Roncancio-Parra, D. (2015). *Estudio sobre la aplicación de las técnicas de filtración por membrana a los sistemas de tratamiento de aguas residuales* (tesis de pregrado, Universidad La Gran Colombia). Repositorio Institucional Universidad La Gran Colombia.
- Salazar-Gómez, L. L., & Saavedra- Antolínez, I. M. (2009). Tratamiento de lixiviados, casos prácticos en diferentes temperaturas. En *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Barranquilla, Colombia, septiembre 24-25.
- Semana (2018, enero 27). Río Magdalena: Viaje por las venas de Colombia. *Semana*. <https://www.semana.com/especiales/articulo/viaje-por-las-venas-de-colombia/554915>
- Segovia Aseo. (2013, noviembre 26). *Segovia aseo E.S.P.* <http://www.segoviaaseo.com/ultimas-noticias/49-manejo-de-lixiviados-en-el-relleno-sanitario.html>
- Sistema de Información Ambiental Colombiano [SIAC]. (2013). *Sistema de Información Ambiental Colombiano*. <http://www.siac.gov.co/>

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Superservicios]. (2017). *Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos*. Superservicios.

Torres, L. P., Barba, H., Ojeda, C., Martínez, J., & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad. *Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 245-255. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n1.2014.960>

Evaluación de la influencia de la agitación para la producción de biomasa microalgal en un fotobiorreactor panel plano a escala laboratorio

Evaluation of the Influence of Agitation for the Production of Microalgal Biomass in a Flat Panel Photobioreactor at Laboratory Scale

Jennifer L. Doncel Núñez

Ingeniera química, Fundación Universidad de América, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-4618-6317> | jennifer.doncel0205@hotmail.com

Heidy L. Moreno Saboyá

Ingeniera química, Fundación Universidad de América, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-6937-5084> | heidyilianamoreno@gmail.com

Fecha de recepción: 11 de mayo de 2020

Fecha de aprobación: 8 de junio de 2020

Sugerencia de citación: Doncel-Núñez, J. L. y Moreno-Saboyá, H. L. (2020). Evaluación de la influencia de la agitación para la producción de biomasa microalgal en un fotobiorreactor panel plano a escala laboratorio. *Mutis*, 10 (1), 46-56. doi:10.21789/22561498.1606

RESUMEN

Se evaluó la influencia de la agitación sobre la producción de biomasa en un fotobiorreactor (FBR) panel plano mediante la modificación de los aspersores en el difusor. La evaluación se realizó mediante la elaboración de 3 difusores con diámetros de aspersor diferentes (1, 2 y 4 mm). A través de un análisis de varianza ANOVA y una prueba *t*, se seleccionaron los diámetros de 1 y 2 mm para ingresar dióxido de carbono (CO₂), obteniendo una tasa de crecimiento de 0,37 días⁻¹ y 0,35 días⁻¹, respectivamente. El análisis indicó que a menor diámetro de aspersor en el difusor mayor tasa de crecimiento. Mediante el planteamiento de las ecuaciones de transferencia de masa se verificó que la disminución del tamaño de la burbuja promueve la transferencia entre las fases gas-líquido.

Palabras clave: microalgas, fotobiorreactores panel plano, agitación, difusor, dióxido de carbono.

ABSTRACT

The influence of agitation on the production of biomass in a flat panel photobioreactor was evaluated by modifying the sprinklers in the diffuser. The evaluation was carried out through the elaboration of 3 diffusers with different sprinkler diameters (1, 2, and 4 mm). The sprinklers with diameters of 1 and 2 mm were selected for the entry of carbon dioxide (CO₂) via ANOVA and *t*-test, obtaining a growth rate of 0.37 days⁻¹ and 0.35 days⁻¹, respectively. The analysis showed that the smaller diameter of the sprinkler in the diffuser, the higher the growth rate. Besides, by considering the mass transfer equations it was verified that the decrease in the size of the bubble promotes the transfer within the gas-liquid phases.

Keywords: Microalgae, flat panel photobioreactors, agitation, diffuser, carbon dioxide.

INTRODUCCIÓN

Para mejorar las condiciones de crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* se han desarrollado diferentes proyectos, tales como la evaluación del crecimiento desde varios tipos de fotobiorreactores (tipos placa plana y *airlift*). Sin embargo, no se ha llevado a cabo un análisis con respecto a la agitación. Por ello, esta investigación busca proponer e incluir este factor en el cultivo de *Chlorella vulgaris*, al ser una alternativa prometedora en procesos de biorremediación de CO₂ que garantiza la mejor distribución de la microalga en el medio cultivo.

Teniendo en cuenta que las microalgas en fotobiorreactores de placa plana poseen altas eficiencias fotosintéticas, pero al mismo tiempo presentan problemas en el control de difusión de CO₂ relacionados principalmente con la transferencia de masa (Soo & Chould-Gyun, 2003), la evaluación de la variable agitación resulta necesaria. El hecho de que la agitación se relacione con la transferencia afecta la disponibilidad de CO₂ para la microalga *Chlorella vulgaris* y, por lo tanto, la producción de biomasa en este tipo de fotobiorreactores.

Para la evaluación del parámetro agitación en este tipo de fotobiorreactores se hizo necesario evaluar el diseño de los difusores (tubo perforado) que involucran aspectos como cantidad de burbujas y diámetro de burbuja (Ladislav *et al.*, 2010) desde la agitación neumática utilizada. Los aspectos antes mencionados fueron objeto de estudio en la presente investigación, la cual se enfoca en el parámetro agitación debido a su efecto en la transferencia de masa, variable

que afecta la disponibilidad de nutrientes e influye en un nivel de producción más elevado al proporcionar un suministro adecuado de CO₂ a través de la interfase cultivo-burbuja y la eliminación de O₂ por generación de turbulencia en el medio (St-Onge, 2013). Aunque el parámetro agitación no ha sido considerado en otras evaluaciones, este es una variable condicionante en la producción de biomasa microalgal.

METODOLOGÍA

La cepa microalgal empleada en esta investigación es *Chlorella vulgaris*, la cual fue suministrada por el grupo de investigación BIOTECFUA de la Fundación Universidad de América y se encontraba en medio líquido en tubos de ensayo, siendo un *back up* de la cepa pura previamente adquirida por otros grupos. Se utilizó como medio de cultivo, agua y el fertilizante agrícola foliar Foliagro en una proporción de 2:1000. El medio de cultivo fue usado desde la fase de incubación hasta el escalamiento al fotobiorreactor, el cual fue esterilizado a una temperatura de 120 °C durante 40 minutos previo a su uso.

La microalga se inoculó y se incubó implementando una incubadora que cumplía con las siguientes condiciones: temperatura óptima de 25 °C, fuente lumínica de halógeno de 8W de color rojo y un fotoperiodo 12/1.

El escalamiento a partir del inóculo inició con un volumen de 10 mL de microalga y 30 mL de medio de cultivo, al cual se le agregó 50 mL de medio de cultivo hasta alcanzar un volumen de 500 mL. Posteriormente, se agregó 100 mL de medio de cultivo hasta

alcanzar 1 L y por último, 150 mL hasta alcanzar 3 L, tras lo cual se procedió con su escalamiento al fotobiorreactor de panel plano.

El desarrollo de esta investigación se enfocó en dos etapas: una fase preexperimental en la cual se seleccionaron los diámetros de aspersor en los tubos difusores con respecto a las curvas de crecimiento, seguida de una fase experimental en la que se evaluó el crecimiento al adicionar una mezcla de CO₂ y aire como fuente de agitación tras emplear los diámetros seleccionados.

Fase preexperimental

En esta fase se llevó a cabo la construcción de dos fotobiorreactores de panel plano en polimetil-metacrilato (PMMA), los cuales contaban con un ducto desgasificador y un termostato en su interior. La figura 1 muestra uno de los fotobiorreactores empleados.

El dimensionamiento de los difusores implicó el conocimiento tanto del diámetro de los aspersores como el espaciado entre estos. Lo anterior se calculó mediante la ecuación 1, en la que se consideró la misma longitud (0,392 m) y cantidad de aspersores.

$$\text{Distancia entre aspersores} = \frac{L - (\text{Cantidad de aspersores} \cdot \text{Diámetro del aspersor})}{\text{Cantidad de aspersores} + 1} \quad (\text{Ec. 1})$$



Figura 1. Fotobiorreactor panel plano
Fuente: elaboración propia.

Los tubos difusores fueron elaborados en policloruro de vinilo (PVC) y se adicionaron a las láminas laterales del fotobiorreactor empleando silicona para vidrios. Estos tubos se cambiaban de forma manual conforme al diámetro con el cual se iba a experimentar. La figura 2 (izquierda) muestra las dimensiones del equipo y las características del tubo difusor (derecha).

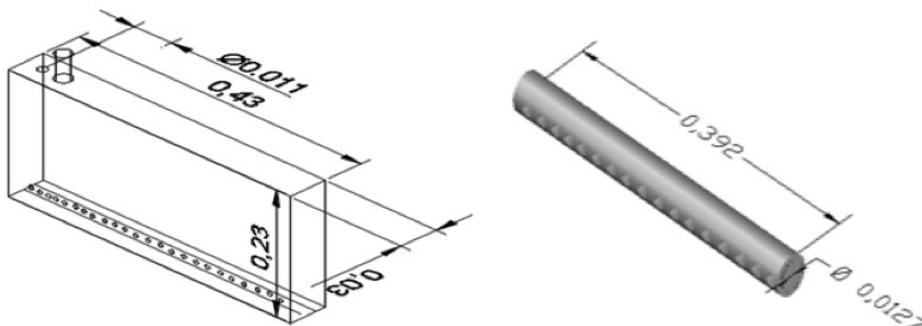


Figura 2. Dimensiones del fotobiorreactor panel plano y los tubos difusores en metros (m)
Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la ecuación que permitió determinar si el equipo resultaba adecuado para el proceso fotosintético fue la relación superficie-volumen (ecuación 2)

cuyas unidades son m⁻¹ (Rubio-Fernández & Hernández, 2016):

$$\text{relación sup - volu} = \frac{\text{área de la placa frontal}}{\text{volumen de equipo}} = \frac{0.08}{0.004} = 20 \text{ m}^{-1} \text{ (Ec.2)}$$

El valor de la relación superficie-volumen cumplió con el rango entre 20 y 200 m^{-1} para la adecuación de luz, por lo que el equipo presentaba buen acceso a la luz, permitiendo que el inóculo realizara el proceso fotosintético sin dificultades.

El montaje del sistema de la etapa preexperimental contaba con una bomba de aire marca Resun AC9904 de 4 salidas que se conectaba a un filtro de trompo mediante mangueras de 6 mm de espesor; este filtro permitió garantizar la esterilidad del aire que entraba al equipo. Luego, se conectó un manómetro Ritherm® 2 ½" que permitió conocer la presión del sistema, la cual se regulaba mediante un sistema de llaves ubicadas a la salida del manómetro. Las mangueras que salían de estas llaves fueron conectadas a los extremos laterales del fotobiorreactor.

Se realizó el conteo celular de microorganismos en un microscopio marca BioBlue mediante una cámara Neubauer durante 15 días (para un mayor período de estudio) cada 24 horas para cada diámetro, obteniendo 3 réplicas de cada diámetro. El número de células por mL se determinó mediante la ecuación 3, donde el volumen de la cámara es de 0,1 mm^3 y los cuadrantes totales son 25 (Hernández, 2014).

$$\frac{\text{Células}}{\text{mL}} = \frac{\text{número de células} * \text{factor de dilución}}{\text{volumen} * \frac{\text{cuadrantes contados}}{\text{cuadrantes totales}}} * \frac{1000 \text{ mm}^3}{1 \text{ mL}} \text{ (Ec.3)}$$

Análisis estadístico

Las curvas de crecimiento de cada difusor fueron evaluadas bajo un análisis de varianza (ANOVA) de un factor con el fin de conocer si existían diferencias significativas en las tasas de crecimiento celular como resultado de los diámetros del aspersor. Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

Hipótesis nula (H_0): no existe una diferencia significativa en las tasas de crecimiento por el cambio en el diámetro en los aspersores.

Hipótesis alterna (H_a): existe una diferencia significativa en las tasas de crecimiento por el cambio en el diámetro en los aspersores.

La hipótesis nula fue aceptada utilizando como criterio de comparación el valor registrado de F con respecto al valor de F crítico a un nivel de significancia de 0,05. Por lo anterior, y como segundo tratamiento estadístico, se procedió a desarrollar la comparación entre parejas para simplificar los niveles (diámetros) y encontrar aquellos que afectaban la variable respuesta (tasas de crecimiento) mediante la comparación del valor de la probabilidad de dos colas $P(T \leq t)$ y la probabilidad de la tabla ANOVA.

Fase experimental

En esta fase se emplearon los diámetros de aspersor de 1 y 2 mm en los tubos difusores que fueron seleccionados en la etapa preexperimental mediante la prueba *t student*.

Antes de iniciar la fase experimental se seleccionó una concentración de CO_2 de 9 % CO_2 y 91 % aire.

El montaje del sistema de la parte experimental (figura 3) involucró el mismo montaje de la parte preexperimental, adicionando un cilindro de 6 m^3 con mezcla (9 % CO_2 v/v) y una tarjeta K-33 ICB como sensor para verificar el porcentaje de CO_2 que entraba al fotobiorreactor de panel plano.

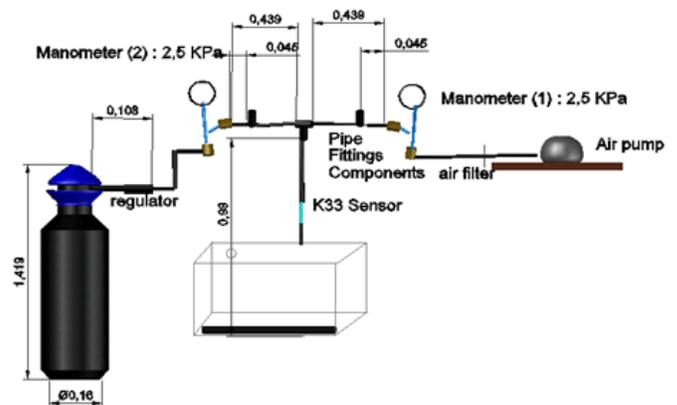


Figura 3. Montaje del sistema experimental y dimensiones de las conexiones (m)
Fuente: elaboración propia.

Haciendo uso del sistema antes descrito, se llevó a cabo la agitación por períodos de 6 y 18 horas con mezcla y aire, respectivamente, manteniendo el caudal fijo mediante un regulador de flujo que manejaba un rango de 0 a 4 L/min.

Teniendo en cuenta que las microalgas muestran una gran dependencia respecto al pH, el cual varía conforme a la cantidad de CO₂ disuelto, este fue monitoreado mediante un potenciómetro marca Milwaukee (figura 4), que registró un valor máximo de 7,5. Para esta fase, el conteo celular se llevó a cabo en una cámara Neubauer durante 10 días para los diámetros de 1 y 2 mm, llevando a cabo 3 réplicas de cada uno. El conteo se realizó durante el tiempo de agitación con el cilindro de CO₂. El número de células por mL se determinó nuevamente con la ecuación 2, incorporando esta vez el factor de dilución debido a que se realizaron diluciones seriadas con un factor de 1:10.



Figura 4. Potenciómetro marca Milwaukee
Fuente: elaboración propia.

Haciendo uso de parámetros poblaciones como la velocidad específica de crecimiento, también conocida como tasa de crecimiento (μ) (Arredondo *et al.*, 2007), y en vista de que las microalgas se reproducen mediante división binaria, la ecuación 4 fue utilizada para el análisis de resultados.

$$\mu = \frac{\left[\frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right)}{\ln(2)} \right]}{(t_2 - t_1)} \quad (\text{Ec. 4})$$

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se dimensionaron los tres difusores con los respectivos diámetros de aspersor (1,2 y 4 mm). Para este fin, se calculó la distancia entre un aspersor y otro, la cual depende primordialmente de la longitud del tubo y de la cantidad de aspersores totales con los que cuenta el difusor. Por lo anterior, se aplicó la ecuación 1 para cada tubo difusor. La figura 5 presenta el resultado final de cada difusor.

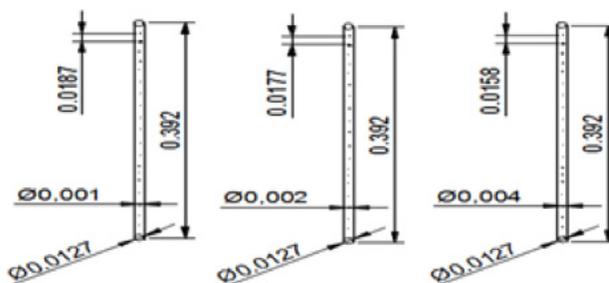


Figura 5. Dimensionamiento del espaciamiento entre los aspersores de los tubos difusores (m)
Fuente: elaboración propia.

Fase preexperimental

Presión de entrada de aire al sistema

Luego de la elaboración de los difusores, con sus respectivos diámetros, se procedió a calcular la presión de entrada de aire al difusor, la cual influye en la formación de la burbuja. Esta se calculó haciendo uso de la ecuación de continuidad y la ecuación de Bernoulli.

Los valores necesarios tanto para la ecuación de continuidad como para la ecuación de Bernoulli se reportan en la tabla 1 y 2, respectivamente, con lo cual se obtuvo que la velocidad 2 y la presión 2 tienen un valor de 0,0665 m/s y 2.511,60 Pa, respectivamente.

Tabla 1. Valores necesarios para la ecuación de continuidad

	Manguera	Difusor
Velocidad del aire (m/s)	0,4272	
Área transversal (m ²)	1,96 *10 ⁻⁵	1,26*10 ⁻⁴

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Valores ecuación de Bernoulli

Variable	Magnitud
Z_1	0,99 m
Z_2	0 m
P_1	2500 Pa
ρ	1,185 Kg/m ³
g	9,8 m/s

Fuente: elaboración propia.

Curvas de crecimiento con aire

Teniendo en cuenta el promedio de cada una de las réplicas por día obtenidas mediante la ecuación 2, a las cuales se aplicó el logaritmo natural para cada concentración, se obtuvieron los resultados señalados en la figura 6.

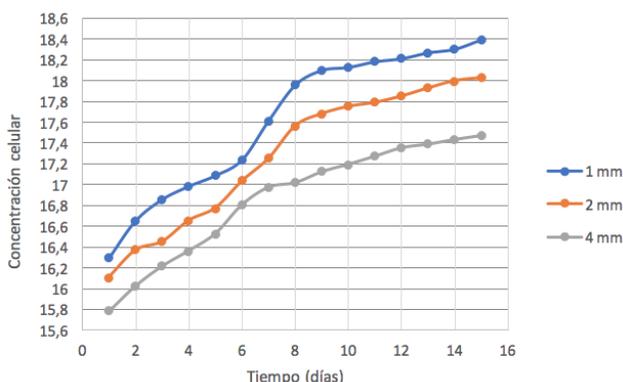


Figura 6. Curvas de crecimiento de *Chlorella vulgaris* con los diferentes diámetros de aspersor

Fuente: elaboración propia.

Como se aprecia en la figura 6, la curva de 4 mm posee una fase exponencial que se prolonga desde el día 5 hasta el día 7. En contraste, la fase exponencial de la curva de 2 mm se ve reflejada entre los días 6 y 9. Por último, la curva de 1 mm presenta una fase exponencial más prolongada que inicia en el día 6 y se extiende hasta el día 10.

A partir de la investigación desarrollada por Mohsenpour y Willoughby (2015), que muestra la tasa de crecimiento para un cultivo con aireación de 99,97 % de aire y 0,03 % de CO₂, se encuentra que los resultados reportados por estos autores corresponden al

doble de la mejor tasa de crecimiento obtenida en la presente investigación, la cual se registró con el diámetro de 1 mm, como se aprecia en la tabla 3. Esto se debió a la cantidad de flujo de aire que afecta el crecimiento, puesto que para obtener una alta tasa de crecimiento a volúmenes de cultivo similares se debe emplear un flujo de 4,44 vvm, como reporta el trabajo de los autores antes mencionados, quienes obtuvieron buenos resultados utilizando dicho flujo y bajo la incidencia de la luz roja. En este sentido, y por cuestiones económicas, esta investigación empleó un flujo de 0,17 vvm, que resulta menor al flujo anteriormente mencionado, lo cual, en efecto, provocó que la fluidización no fuese suficiente para que cada una de las microalgas recibiera la misma cantidad de luz proveniente de las lámparas de halógeno de luz roja. Por lo anterior, se produjo una desaceleración en el crecimiento del cultivo.

Tabla 3. Tasas de crecimiento

Diámetro (mm)	Tasa de crecimiento propia (días ⁻¹)	Tasa de crecimiento Mohsenpour y Willoughby [2015] (días ⁻¹)
1	0,217	0,42
2	0,198	-
4	0,174	-

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, los valores promedio de las tasas de crecimiento permitieron apreciar que bajo los diámetros de aspersor de 1 y 2 mm se presentó una mayor velocidad de crecimiento con respecto al diámetro de 4mm. Lo anterior fue puesto a prueba posteriormente con el análisis de varianza ANOVA y la prueba t.

El análisis estadístico se llevó a cabo con una tabla ANOVA de un factor donde se compararon las tasas de crecimiento con respecto a los diámetros de aspersor en el difusor, utilizando un valor de significancia de 0,05. La tabla 4 presenta los resultados de los análisis de varianza indicando que no existe una diferencia significativa en las tasas de crecimiento al obtener un valor de *F* menor al *F* crítico (3,2199).

Tabla 4. Resultados análisis de varianza ANOVA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,013694307	2	0,006847153	0,346894226	0,70888621	3,219942293
Dentro de los grupos	0,829014783	42	0,019738447			
Total	0,842709089	44				

Fuente: elaboración propia.

En vista de los resultados obtenidos, se realizó una comparación entre parejas para simplificar los diámetros y encontrar aquellos que afectaban las tasas de crecimiento. Mediante el método de Dunnett, se obtuvo que los diámetros de 1 y 2 mm presentaban cambios significativos debido a la comparación de

probabilidad de 2 colas con respecto a la probabilidad de la tabla ANOVA, la cual es mayor, como se aprecia en la tabla 5. Por ende, se determinó que estos diámetros (1 y 2 mm) eran adecuados para llevar a cabo la fase experimental.

Tabla 5. Análisis de varianzas desiguales entre los grupos de 1mm y 2 mm

	1 mm	2 mm
Media	0,217071218	0,197806213
Varianza	0,032387217	0,01831539
Observaciones	14	14
Diferencia hipotética de las medias	0	-
Grados de libertad	24	-
Estadístico <i>t</i>	0,320123824	-
P (T <= t) una cola	0,375822423	-
Valor crítico de <i>t</i> (una cola)	1,71088208	-
P (T <= t) dos colas	0,751644847	-
Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)	2,063898562	-

Fuente: elaboración propia.

Fase experimental

Utilizando la ecuación de continuidad y la ecuación de Bernoulli se calculó la presión con la que la mezcla de CO₂ ingresaría al difusor. Debido a que la densidad de

la mezcla en la parte experimental varía con respecto a la densidad de la fase preexperimental (aire) fue necesario calcular la densidad de la mezcla con un valor de 1,25 Kg/m³.

Con la densidad calculada anteriormente y los valores que se presentan en la tabla 6 se halló la presión a la entrada del difusor. Todas las variables de esta ecuación se mantuvieron constantes con respecto a la fase preexperimental, exceptuando la densidad. El resultado obtenido señala que la presión 2 debe ser de 2.534,19 Pa. Teniendo en cuenta este resultado, se observó que el valor de P_2 de la fase preexperimental reportó una diferencia porcentual de 0,00892 con respecto al valor de P_2 de la fase experimental. Por lo anterior, este valor no presentó una diferencia significativa.

Tabla 6. Valores ecuación de Bernoulli

Variable	Magnitud
Z_1	0,99 m
Z_2	0 m
P_1	2500 Pa
ρ	1,25 kg/m ³
g	9,8 m/s

Fuente: elaboración propia.

Curvas de crecimiento con CO₂

Utilizando los diámetros de aspersor seleccionados en la fase preexperimental (1 y 2 mm) se procedió a desarrollar la curva de crecimiento de la microalga, la cual se representó con el promedio de cada una de las réplicas por día. A dichas réplicas, a su vez, se les aplicó el logaritmo natural para cada concentración.

Por un lado, con el diámetro de 2 mm se obtuvo una tasa de crecimiento de 0,35 días⁻¹ (10 días de cultivo), la cual resulta superior a la reportada por Suárez-Chaparro y Chicagui (2014), quienes utilizaron el mismo porcentaje de mezcla e igual diámetro y obtuvieron un valor promedio de tasa de crecimiento de 0,18 días⁻¹ (5 días de cultivo). Lo anterior se debe a que la presente investigación consideró los caudales a suministrar al difusor en contraste con la investigación realizada por estos autores, lo que influyó en la manera en que se llevó a cabo la mezcla. Por otra parte, con un diámetro de aspersor de 1 mm se obtuvo una tasa

de crecimiento de 0,37 días⁻¹, que es superior a la registrada con el diámetro de 2 mm.

El incremento celular registrado se debe a que las burbujas formadas con el diámetro de aspersor de 1 mm subían a baja velocidad, haciendo que estas permanecieran más tiempo en el cultivo. De esta forma, el CO₂ que se encontraba en la burbuja tenía más tiempo para disolverse. La figura 7 muestra las curvas de crecimiento con 1 y 2 mm de diámetro de aspersor en el difusor usando la mezcla de CO₂.

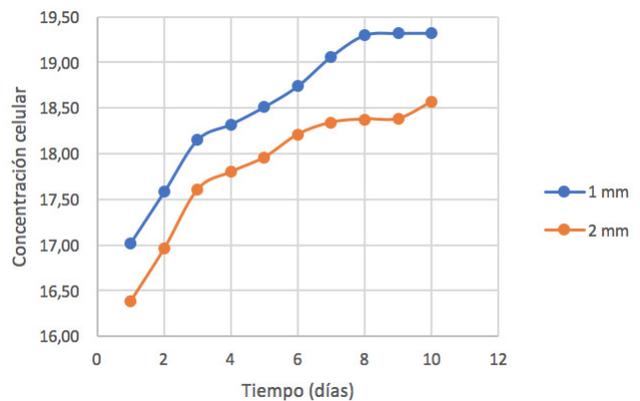


Figura 7. Curvas de crecimiento con CO₂ a diferentes diámetros de aspersor
Fuente: elaboración propia.

Según el trabajo de los investigadores Doucha *et al.* (2005), el rango de presión mínimo de CO₂ que debe ingresar al cultivo es de 0,1-0,2 KPa, el cual tiene como objetivo evitar que se limite el crecimiento de la microalga por escasez de CO₂ y minimizar las emisiones de este compuesto a la atmósfera. Por ello, la presión parcial de CO₂ utilizada en esta investigación fue de 0,225 KPa, la cual se relaciona con el caudal empleado y explicado en la parte preexperimental.

Los resultados presentados en la tabla 7 permiten apreciar que a menor diámetro de aspersor aumenta la tasa de crecimiento. Esto se debe a que las burbujas con diámetros inferiores se comportan como esferas rígidas con una superficie inmóvil (Doucha & Lívanskjý, 1998), lo que disminuye la probabilidad de coalescencia entre burbujas y evita que incremente tanto su tamaño como la velocidad con la que asciende (Kadic & Heindel, 2014), por lo cual se mantienen intactas desde su salida en el difusor hasta la superficie del líquido, contribuyendo a homogeneizar las diferentes zonas dentro del cultivo. Al respecto, cabe

resaltar que una burbuja que asciende con menor velocidad tendrá un mayor tiempo de residencia en el fotobiorreactor de panel plano (Kadic & Heindel, 2014).

Por otro lado, Mohsenpour y Willoughby registran tasas de crecimiento menores en comparación con las obtenidas en esta investigación, como se aprecia en

la tabla 7. Esta situación se debe al bajo caudal utilizado en nuestro experimento, el cual evitó que la concentración de CO₂ empleada (9 % de CO₂) ocasionara una reducción considerable en el pH, que, como resultado, disminuye la actividad fotosintética e inhibe el crecimiento.

Tabla 7. Tasas de crecimiento con CO₂

Diámetros (mm)	Tasa de crecimiento propia (9 % CO ₂ , días ⁻¹)	Tasa de crecimiento de Mohsenpour y Willoughby [2015] (5 % CO ₂ , días ⁻¹)	Tasa de crecimiento de Mohsenpour y Willoughby [2015] (15 % CO ₂ , días ⁻¹)
1	0,37		
2	0,35	0,18	0,33

Fuente: elaboración propia.

Estos valores confirmaron el hecho de que bajo las condiciones del difusor de 1 mm en el aspersor se obtienen burbujas con mayor área interfacial lo cual conduce a una mayor transferencia de CO₂ en las fases gas-líquido (Kadic & Heindel, 2014).

Planteamiento teórico de las ecuaciones de transferencia de masa en el fotobiorreactor panel plano

Dentro de la revisión bibliográfica realizada se encontró el modelo de la película que permite explicar la transferencia de masa dentro del fotobiorreactor de panel plano, el cual explica la trayectoria del sustrato gaseoso desde la burbuja hasta un organelo en el microorganismo mediante una serie de resistencias.

Al emplear el anterior modelo y utilizar como supuestos teóricos que (i) la fase líquida está a igual temperatura que la fase gaseosa (donde las burbujas tenían un tamaño uniforme y constante); (ii) la presión de CO₂ en cada burbuja alcanzaba la presión de saturación; y (iii) que el sistema se encontraba perfectamente mezclado, la transferencia de masa en la interfase gas-líquido como paso limitante a la transferencia de masa general se expresa como se muestra en la ecuación 5.

La ecuación 5 presenta dos parámetros experimentales (coeficiente de transferencia de masa y área interfacial) que son difíciles de medir por sí solos, por lo que estos se combinan en uno dando lo que se conoce como el coeficiente volumétrico de transferencia de masa [(Dutta, 2008).

$$\frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{dt} = -k_L a RT \left(\frac{P_{CO_2}^{burbuja}}{H} - [dCO_2] \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

Se debe aclarar que el área interfacial (que hace parte del producto) se relaciona con el atrapamiento del gas () y el diámetro de la burbuja (), como se aprecia en la ecuación 6. Este parámetro permite explicar los resultados obtenidos en esta investigación utilizando como variable los diámetros de aspersor en el difu-

sor (Kadic & Heindel, 2014), puesto que al disminuir el diámetro de aspersor en el difusor, y por tanto el tamaño de la burbuja, aumenta el área interfacial que se relaciona directamente con el flujo de CO₂ desde la fase gaseosa a la fase líquida.

$$a [m^{-1}] = \frac{6\varepsilon}{d_B} \quad (\text{Ec. 6})$$

CONCLUSIONES

Los fotobiorreactores de panel plano construidos en láminas de PMMA de 0,008 m presentaron buena resistencia térmica y mecánica. Así mismo, tanto el área de las placas como el volumen del equipo aseguraron una relación superficie/volumen que cumple con rangos establecidos por otros investigadores para garantizar el proceso fotosintético. A su vez, la selección de PVC como material para la elaboración de los difusores garantizó una fácil manipulación y un bajo costo al momento de su implementación en el fotobiorreactor de panel plano.

Los diámetros utilizados en la parte preexperimental corresponden a 1, 2 y 4 mm. Mediante el análisis ANOVA y la prueba *t* se comprobó que aunque no existe una diferencia significativa en las tasas de crecimiento celular entre estos (0,217 días⁻¹, 0,198 días⁻¹ y 0,174 días⁻¹, respectivamente) a causa del caudal empleado de 0,17 vvm, la pareja conformada por los diámetros 1 y 2 mm sí presenta cambios significativos. Por consiguiente, se realizó la parte experimental con estos dos diámetros.

Empleando una mezcla de 9 % CO₂ v/v y utilizando los diámetros de 1 y 2 mm durante la fase experimental, se obtuvieron tasas de crecimiento 0,37 días⁻¹ y 0,35 días⁻¹, respectivamente. Estos resultados demuestran que a menor diámetro de aspersor se obtiene un aumento en la tasa de crecimiento. Así mismo, permiten comprobar que a pesar de utilizar un bajo caudal (0,17 vvm) y una alta presión parcial de CO₂ (0,225 KPa), con respecto a investigaciones anteriores, se logra evitar una reducción del pH y, con ello, disminuir la actividad fotosintética e inhibir el crecimiento.

El modelo de la película junto con los supuestos expresados para el sistema permiten confirmar que el tamaño de la burbuja generado por el aspersor afecta directamente el crecimiento del cultivo. En contraste, se comprueba que una burbuja pequeña con mayor área interfacial, la cual asciende con menor velocidad por el medio de cultivo y por lo tanto tiene un mayor tiempo de residencia en el fotobiorreactor, conduce a una mayor transferencia de masa entre las fases gas-líquido.

REFERENCIAS

- Arredondo, B. O., Voltolina, D., & Cordero, B. (2007). Concentración, recuento celular y tasa de crecimiento. En B. O. Arredondo, D. Voltolina, T. Zenteno, M. Arce, & G. A. Gómez (eds.), *Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal* (pp. 25-27). CONACYT.
- Doucha, J., & Lívansjý, K. (1998). Influence of solar irradiance, culture temperature and CO₂ supply on daily course of O₂ evolution by *Chlorella* mass cultures in outdoor open thin-layer culture units. *Algological Studies*, 89, 137-149. https://doi.org/10.1127/algol_stud/89/1998/137
- Doucha, J., Straka, F., & Lívanský, K. (2005). Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *Journal of Applied Phycology*, 17, 403-412. <https://doi.org/10.1007/s10811-005-8701-7>
- Dutta, R. (2008). *Fundamentals of Biochemical Engineering*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77901-8>
- Hernández, G. A. (2014). *Evaluación de las incidencias de salinidad y pH sobre la biomasa, productividad y acumulación de lípidos en cultivos de Chlorella Vulgaris en un fotobiorreactor de placa plana* [trabajo de grado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Fundación Universidad de América.
- Kadic, E., & Heindel, T. J. (2014). *An introduction to bioreactor hydrodynamics and gas-liquid mass transfer*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118869703>
- Ladislav, N., Cervený, J., Keren, N., & Kaplan, A. (2010). Experimental validation of a nonequilibrium model of CO₂ fluxes between gas, liquid medium, and algae in a flat-panel photobioreactor. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 37(12), 1319-1326. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0876-5>

- Mohsenpour, S. F., & Willoughby, N. (2013). Luminescent photobioreactor design for improved algal growth and photosynthetic pigment production through spectral conversion of light. *Bioresource Technology*, *142*, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.024>
- Mohsenpour, S. F., & Willoughby, N. (2015). Effect of CO₂ aeration on cultivation of microalgae in luminescent photobioreactors. *Biomass and Bioenergy*, *85*, 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.002>
- Rubio-Fernández, D., & Hernández, G. A. (2016). Evaluación de las incidencias de salinidad y pH sobre la biomasa, productividad y acumulación de lípidos en cultivos de *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de placa plana. *ITECKNE*, *13*(1), 44-56. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v13i1.1381>
- Soo, S., & Choul-Gyun, L. (2003). Photobioreactor engineering: design and performance. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, *8*, 313-321. <https://doi.org/10.1007/BF02949274>
- St-Onge, P. (2013). *Optimisation en temps réel de la production de microalgues en photobioréacteur par la commande extrémale*. Université du Québec.
- Suárez-Chaparro, M. Y., & Chicagui-Larrota, J. E. (2014). *Evaluación de la influencia del dióxido de carbono y la concentración inicial de Chlorella Vulgaris sobre la producción de lípidos a escala laboratorio* [trabajo de grado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Fundación Universidad de América.

Listado de plantas ornamentales urbanas de Tunja (Boyacá, Colombia)

A List of Urban Ornamental Plants in Tunja (Boyacá, Colombia)

Wilson Ricardo Álvaro Alba

Grupo de Investigación Biología para la Conservación, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-3089-9515> | walvaroa@gmail.com

Mónica Patricia Díaz Pita

Grupo de Investigación Biología para la Conservación, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
<https://orcid.org/0000-0001-9477-694X> | monicadiazp@gmail.com

Fecha de recepción: 20 de abril de 2020

Fecha de aceptación: 29 de mayo de 2020

Sugerencia de citación: Álvaro-Alba, W. R. y Díaz-Pita, M. P. (2020). Listado de plantas ornamentales urbanas de Tunja (Boyacá, Colombia). *Mutis*, 10(1), 57-78. doi: 10.21789/22561498.1602

RESUMEN

Se presenta el inventario florístico de las plantas ornamentales de la ciudad de Tunja (Boyacá). Se encontraron 430 especies, distribuidas en 314 géneros y 101 familias, de las cuales 307 especies son Eudicotiledóneas, 96 Monocotiledóneas, 11 Pteridofitos, 10 Gimnospermas y 6 Magnólidas. A nivel florístico, las familias Asteraceae, Cactaceae, Orchidaceae, Solanaceae y Asparagaceae presentaron el mayor número de géneros y especies. El hábito de crecimiento más importante en términos de riqueza de especies fue el de las hierbas, seguido por los hábitos leñosos (árboles y arbustos). En ambientes de exterior se encontraron más especies de tipo arbóreo y arbustivo, mientras que en ambientes de interior predominaron las suculentas. Se registran 12 especies con algún grado de amenaza de acuerdo con la clasificación de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, en inglés).

Palabras clave: ambientes urbanos, diversidad de plantas vasculares, plantas de jardín, plantas de interior, riqueza florística.

ABSTRACT

The floristic inventory of the ornamental plants of the city of Tunja (Boyacá) is presented in this paper. A total of 430 species were found, distributed in 314 genera and 101 families, of which 307 species are Eudicotyledonous, 96 Monocotyledonous, 11 Pteridophytes, 10 Gymnosperms and 6 Magnolids. At the floristic level, the families Asteraceae, Cactaceae, Orchidaceae, Solanaceae and Asparagaceae presented the highest number of genera and species. The most important growth habit in terms of species richness was that of herbs, followed by woody habits (trees and shrubs). Tree and shrub species thrive in outdoor environments, while succulents predominate indoors. Twelve species with some degree of threat, according to the International Union for Conservation of Nature (IUCN), were registered in this study.

Keywords: Floristic richness, garden plants, indoor house plants, urban environments, vascular plants diversity.

INTRODUCCIÓN

El uso de las plantas por parte del hombre se remonta a tiempos prehistóricos (Sánchez-de-Lorenzo, 2001). Las plantas ornamentales generalmente ocupaban un segundo plano de interés, al considerarse un adorno estético (Fernández, 1990), y daban cuenta de un estatus socioeconómico alto, puesto que los propietarios de los jardines eran únicamente los gobernantes, en el caso del antiguo Egipto (Fariello, 2004). La naturaleza fue la primera dueña de los jardines y es la fuente principal de ideas para su diseño. Pero es el hombre quien siempre ha ejercido una tradición cultural por la naturaleza, en especial por las flores, las cuales hacen que los actos cotidianos y simples de la humanidad estén dedicados a su utilización, significado y cuidados (Brooklyn Botanic Garden, 2001; Villegas, 1990).

Desde sus comienzos, las civilizaciones han deseado rodearse de estas plantas para admirar su belleza y así dar origen a jardines que adornan palacios, parques, edificios y mansiones privadas. Como ejemplo a destacar se encuentran los jardines colgantes de las antiquísimas ciudades de Babilonia y Nínive, que fueron considerados como una de las grandes maravillas del mundo antiguo. Desde entonces, en todas las culturas se ha dado notable importancia a la jardinería o el arte de cultivar plantas y flores con fines ornamentales (Fariello, 2004).

Colombia es considerada el país de las flores, donde el culto a ellas se destaca en todas sus manifestaciones a través de la historia, ya que ocupan un lugar muy importante en la religión, la literatura, el arte, la artesanía, los jardines de casas modernas y coloniales, las expresiones folclóricas y la ciencia. En esta última

se generó un importante interés a partir de la primera Expedición Botánica, llevada a cabo en el siglo XVIII (Villegas, 1990). Las flores son importantes también para la economía del país, el cual es catalogado como el segundo exportador de este producto en el mundo (Manrique *et al.*, 2014).

Hoy en día las plantas ornamentales no solo se emplean para adornar jardines, calles y balcones, sino que además contribuyen al mejoramiento ambiental de las ciudades, por cuanto disminuyen los niveles de dióxido de carbono atmosférico, aumentan los niveles de oxígeno mediante la fotosíntesis vegetal, modifican el microclima al proporcionar sombra y aumentar la humedad atmosférica (gracias a la transpiración foliar), son barreras protectoras contra el viento, sirven de refugio y hábitat a muchos animales, especialmente aves (Fernández, 1990), reducen el estrés laboral, favorecen la concentración y generan sensación de bienestar (Soto, 2017). Adicionalmente, los árboles representan un patrimonio histórico y emblemático de las ciudades (Mahecha *et al.*, 2010) y junto con otros componentes arquitectónicos se utilizan para encerrar, contener, agrandar, reducir y articular el espacio exterior (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2003). Además, amortiguan el ruido o los sonidos molestos, valorizan la propiedad, controlan la erosión y contribuyen a la estabilización de taludes (Tovar, 2007).

Por las razones antes expuestas, y debido a que actualmente se está presentando una reducción importante de las áreas silvestres a nivel mundial por la intervención del hombre, los jardines han sido catalogados como santuarios ecológicos a explorar (Brooklyn Botanic Garden, 2001). Por ello, este trabajo tiene como finalidad presentar un inventario exhaustivo de

la flora ornamental vascular de la ciudad de Tunja, así como aportar información relacionada sobre los nombres comunes de cada especie y destacar la importancia ornamental y usos de las familias y especies botánicas más representativas de dicha ciudad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de Tunja se encuentra ubicado sobre la cordillera Oriental, en la parte central del departamento de Boyacá, localizado a $05^{\circ}32'7''\text{N}$ y $37^{\circ}22'04''\text{O}$, con alturas desde 2.700 hasta 3.150 m, una extensión de 121,4 Km^2 y una temperatura de 13°C . Limita por el norte con los municipios de Motavita y Cóbbita, al oriente con los municipios de Oicatá, Chivatá, Soracá y Boyacá, por el sur con Ventaquemada y por el occidente con los municipios de Samacá, Cucaita y Sora (Alcaldía Mayor de Tunja, 2012), como se muestra en la figura 1.

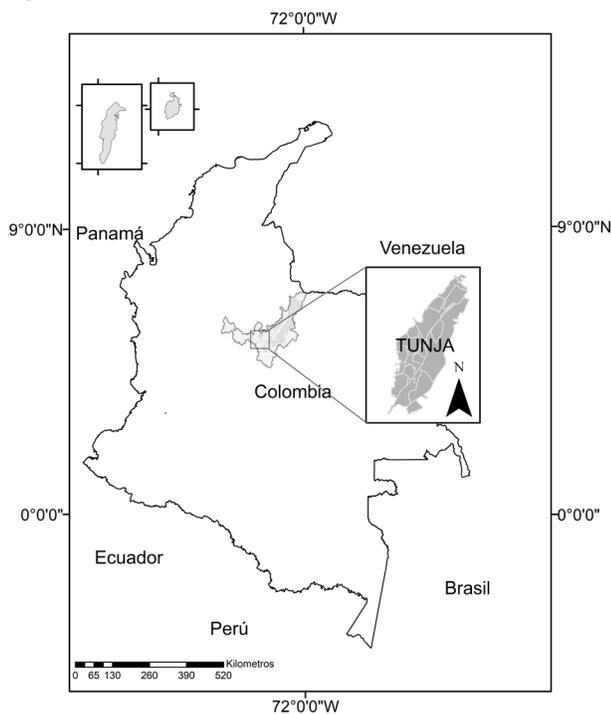


Figura 1. Ubicación del área de estudio (Tunja, Boyacá)
Fuente: elaboración propia.

Muestreo de plantas ornamentales

La recopilación de información sobre las plantas ornamentales se realizó de 2016 a 2019, teniendo en

cuenta las épocas secas y lluviosas. La búsqueda de las plantas se efectuó en jardines de casas y conjuntos cerrados, colegios, parques principales de la ciudad, universidades y separadores de avenidas principales. Además, se visitaron viveros e invernaderos de la ciudad de Tunja. El inventario de las especies se realizó a partir de la toma de fotografías de la planta completa y el registro de caracteres morfológicos específicos (estructuras reproductivas y presencia de exudados, entre otros) que facilitaron su posterior identificación taxonómica. Adicionalmente, se registró información relacionada con el nombre común y el ambiente en donde se encontró cada planta (interior, exterior). El hábito de crecimiento (árbol, arbusto, hierba, liana, enredadera, suculenta, sufrutescente) se determinó con base en la propuesta de Judd *et al.* (1999) y Mendoza y Ramírez (2006).

Identificación de especies

El material vegetal se determinó *in situ*, en algunos casos, por consultas minuciosas en catálogos a partir de la revisión de las fotografías tomadas a cada una de las especies. Las claves y la literatura especializada revisada incluyen a Byrd Graf (1981), Bartholomäus *et al.* (1990), Molina *et al.* (1998), Brickell (The Royal Horticultural Society, 2000), Rodríguez (2002), Sánchez-de-Lorenzo (2001), Cheers (2006), Infante-Betancour *et al.* (2008), Sierra-Guerrero y Amarillo-Suárez (2014), Galvis (2014) y Mahecha (2015). Los sistemas de clasificación consultados siguen la propuesta de Christenhusz *et al.* (2011) para gimnospermas, Christenhusz *et al.* (2011) para pteridófitos y la de The Catalogue of Life Partnership para el caso de angiospermas (2017). La nomenclatura de las especies se corroboró en la base de datos The Plant List¹ y el International Plant Name Index² (IPNI).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización florística

Para la ciudad de Tunja se registran 430 especies de plantas ornamentales (anexo 1), agrupadas en 314 géneros y 101 familias, organizadas en cinco grupos: Eudicotyledonea, Magnoliids, Monocotyledonea, Pinophyta y Pteridófitos (tabla 1).

1 <http://www.theplantlist.org>

2 <https://www.ipni.org>

Tabla 1. Inventario florístico de plantas ornamentales de Tunja

Clase	N.º familias	N.º géneros	N.º especies
Eudicotyledoneae	72	222	307
Magnoliids	2	3	6
Monocotiledónea	16	73	96
Pinophyta	5	7	10
Pteridophyta	6	9	11
Total	101	314	430

Fuente: elaboración propia.

Las familias con el mayor número de géneros y especies son Asteraceae (30 géneros, 36 especies), Cactaceae (16, 20), Orchidaceae (13, 15), Solanaceae (13, 15), Asparagaceae (11, 18), Araceae (9, 14) y Crassulaceae (7,19), como se detalla en la tabla 2. El 80 % de las familias (81) tienen menos de cinco géneros. Así mismo, 78 % de las familias (79) se encuentran representadas por menos de seis especies.

Tabla 2. Familias con mayor riqueza de géneros y especies de plantas ornamentales en Tunja

Familias	N.º géneros y porcentaje (%)	N.º especies y porcentaje (%)
Asteraceae	30 (9,6)	36 (8,4)
Cactaceae	16 (5,1)	20 (4,7)
Orchidaceae	13 (4,1)	15 (3,5)
Solanaceae	13 (4,1)	15 (3,5)
Asparagaceae	11 (3,5)	18 (4,2)
Araceae	9 (2,9)	14 (3,3)
Crassulaceae	7 (2,2)	19 (4,4)
Fabaceae	7 (2,2)	11 (2,6)
Acanthaceae	7 (2,2)	11 (2,6)
Lamiaceae	7 (2,2)	10 (2,3)
Malvaceae	6 (1,9)	8 (1,9)
Asphodelaceae	6 (1,9)	7 (1,6)
Euphorbiaceae	5 (1,6)	11 (2,6)

Fuente: elaboración propia.

Las Asteráceas son ampliamente cultivadas en parques y jardines por el atractivo de sus inflorescencias, follaje o fructificación (Del-Vitto & Petenatti, 2015). Algunas especies son muy atractivas por sus llamativos capítulos de flores liguladas, como es el caso de *Achillea millefolium* L., *Argyranthemum frutescens* (L.) Sch. Bip., *Aster amellus* L., *Calendula officinalis* L., *Callistephus chinensis* (L.) Nees, *Chamaemelum nobile* (L.) All., *Chrysanthemum morifolium* Ramat., *Coreopsis auriculata* L., *Dahlia* spp., *Erigeron karvinskianus* DC., *Felicia drakensbergensis* J.M. Wood & M.S. Evans, *Gaillardia x grandiflora* Van Houtte, *Gazania rigens* (L.) Gaertn., *Ismelia carinata* (Schousb.) Sch.Bip., *Helichrysum bracteatum* (Vent.) Haw., *Leucanthemum vulgare* Lam., *Osteospermum* spp., *Pericallis hybrida* B. Nord., *Tagetes* spp. y *Zinnia peruviana* (L.) L.; las que tienen capítulos de flores flosculosas vistosas, como *Silybum marianum* (L.) Gaertn.; aquellas utilizadas como flor de corte, *Gerbera jamesonii* Adlam, *Helianthus annuus* L.; otras cuyas inflorescencias resultan poco vistosas pero que compensan este rasgo con un follaje blanco-lanoso o discolor, *Centaurea cineraria* L., *Helichrysum petiolare* Hilliard & B.L. Burtt, *Leucophyta brownii* Cass., *Santolina chamaecyparissus* L., *Jacobaea maritima* (L.) Pelser & Meijden, *Senecio niveoauratus* Cuatrec.; las enredaderas, *Senecio tamoides* DC.; las de estrato arbóreo, como *Smilax pyramidalis* (Triana) H. Rob.; las suculentas, *Senecio rowleyanus* H. Jacobsen.; y las de uso potencial para reforestación, como *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers.

Las cactáceas son muy abundantes en los viveros y tienen una alta demanda por ventajas relacionadas con el cuidado mínimo que requieren. Según Bueno y Plummed (2017), estas plantas necesitan regarse con poca frecuencia, toleran altas temperaturas y crecen en una amplia variedad de sustratos. Además, especies del género *Mammillaria* son utilizadas para capturar las radiaciones emitidas por los monitores de computadores (Grijalva, 2006). El 47 % de los cactus está en peligro y el 86 % de los que se utilizan en horticultura provienen de poblaciones silvestres en peligro de extinción —más que de su cultivo— debido a que la reproducción de diversas especies tarda mucho tiempo (Bizberg, 2016), como es el caso de algunas especies de los géneros *Melocactus* y *Pilosocereus*. Algunas especies de cactus se pueden utilizar como cercas vivas; por ejemplo, *Acanthocereus tetragonus* (L.) Hummelinck, *Austrocylindropuntia cylindrica* (Lam.) Backeb.,

Austrocylindropuntia subulata (Muehlenpf.) Backeb., *Cereus hexagonus* (L.) Mill., *Opuntia caracasana* Salm-Dyck, *Opuntia microdasys* (Lehm.) Pfeiff., *Opuntia microdasys* subsp. *rufida* (Engelm.) U. Guzmán & Mandujano, *Pilosocereus lanuginosus* (L.) Byles & G.D.Rowley y *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb.

Colombia es el país con mayor diversidad de especies de orquídeas, las cuales se destacan como ornamentales por lo vistoso de sus flores y porque presentan diversos tamaños, colores y variedad de formas, como en los géneros, *Anguloa*, *Arundina*, *Cattleya*, *Epidendrum*, *Masdevallia*, *Miltoniopsis*, *Paphiopedilum*, *Phalaenopsis*, *Phragmipedium*, entre otros. Según Castellanos y Torres (2018), desde hace varios años existe la cultura de recolectar plantas silvestres por parte de expertos y aficionados, quienes las venden a coleccionistas y comerciantes. Actualmente, existen varios híbridos con valor ornamental obtenidos a partir de técnicas de propagación *in vitro*, lo cual ha permitido que las personas puedan adquirir una gran diversidad de especies de forma más accesible.

Nuestros hallazgos permiten concluir que los géneros con mayor riqueza de especies son *Begonia*, *Euphorbia*, *Ficus*, *Fuchsia* y *Oxalis* (tabla 3) y que la mayoría de los géneros (96 %) incluyen de una a tres especies.

Tabla 3. Géneros con mayor número de especies y porcentaje con relación al total de especies ornamentales de Tunja.

Géneros	N.º de especies y porcentaje (%)
<i>Begonia</i>	9 (2,1)
<i>Euphorbia</i>	6 (1,4)
<i>Ficus</i>	6 (1,4)
<i>Fuchsia</i>	5 (1,2)
<i>Oxalis</i>	5 (1,2)
<i>Acacia</i>	4 (0,9)
<i>Bryophyllum</i>	4 (0,9)
<i>Dianthus</i>	4 (0,9)
<i>Opuntia</i>	4 (0,9)
<i>Pelargonium</i>	4 (0,9)
<i>Peperomia</i>	4 (0,9)
<i>Sedum</i>	4 (0,9)

Fuente: elaboración propia.

El género *Begonia* se distingue por su importancia económica y valor ornamental. El cultivo de este género es de gran interés por la forma y el color vistoso de sus hojas, así como por su fácil propagación y cuidado (Jiménez & Schubert, 1997). Las especies de este género se encontraron principalmente al interior de casas y unas pocas especies, como *Begonia cucullata* var. *hookeri* L.B. Sm. & B.G. Schub. y *Begonia maculata* Raddi, se observaron en jardines de universidades, colegios, empresas y parques.

Las especies arbustivas del género *Euphorbia* se cultivan por sus hojas o las brácteas coloreadas que rodean a las flores (Sánchez-de-Lorenzo, 2001), como es el caso de *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch, *Euphorbia milii* Des Moul. y *Euphorbia cotinifolia* L. Otras especies tienen aspecto cactiforme, carecen de hojas (o están reducidas) y, en ocasiones, están provistas de espinas. Las especies de hábito suculento presentan tallos adaptados para el almacenamiento de agua y cumplen las funciones de asimilación que corresponden a las hojas (Sánchez-de-Lorenzo, 2001), como *Euphorbia tirucalli* L., *Euphorbia trigona* Mill. y *Euphorbia tithymaloides* L.

En general, las especies de *Ficus* han sido utilizadas para proporcionar sombra y protección de cuencas, gracias a sus copas densas, evitar la erosión de terrenos, al poseer una gran formación de raíces, y también como cercas vivas, alimento para aves y ornamentales (Ibarra-Manríquez *et al.* 2012). El cultivo de especies arbóreas atrae una importante diversidad de aves por sus frutos carnosos, lo cual facilita la dispersión de semillas y favorece su crecimiento, puesto que estas especies presentan gran adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales (Valverde & Hine, 2002), como es el caso de *Ficus soatensis* Dugand, *Ficus tequendamae* Dugand y *Ficus velutina* Willd., las cuales se encuentran en separadores viales, senderos peatonales, campus universitarios y andenes. También se destacan *Ficus benjamina* L., especie cultivada al interior de casas y edificios y en algunos espacios exteriores, donde es empleada como cerca viva en parques y jardines, y *Ficus pumila* L., arbusto de hábito trepador que cubre paredes de casas modernas.

Hábito de crecimiento

Las familias botánicas que forman las plantas crasas son Cactaceae, Crassulaceae, Asphodelaceae, Aizoaceae y Euphorbiaceae, aunque otras familias como Apocynaceae y Asparagaceae también tienen representantes de plantas suculentas. De acuerdo con Sánchez-de-Lorenzo (2001), las crasas son útiles y combinan bien con rocas y gravas volcánicas de diversas tonalidades, además responden muy bien a la multiplicación vegetativa y en general son de fácil cultivo; en particular algunas suculentas.

El hábito predominante en términos de riqueza fue el de las hierbas (45,1 %), seguido por los hábitos arbustos, suculentas y árboles. Los demás hábitos de crecimiento presentaron menos de 20 especies (tabla 4). Las hierbas están mejor representadas por las familias Asteraceae (23 especies), Orchidaceae (15) y Araceae (13). En árboles, la familia dominante en número de especies es Fabaceae (10), seguida de Moraceae (5); las demás familias presentaron de 1 a 3 especies. Las familias de arbustos más representativas son Malvaceae y Solanaceae (7 especies cada una), Euphorbiaceae (6) y Onagraceae (5). En cuanto a las suculentas, la familia Cactaceae fue el grupo mejor representado, con 20 especies, seguida de Crassulaceae, con 19. Para el hábito sufrutescente, la familia Asteraceae (6) presenta el mayor número de especies. Las familias más importantes dentro de las lianas y enredaderas son Apocynaceae y Bignoniaceae (tres especies cada una) y Convolvulaceae y Lamiaceae (dos especies cada una).

Las plantas ornamentales herbáceas se encontraron en todos los ambientes, ya que son fácilmente cultivadas por la belleza de su follaje y sus flores, su fácil reproducción o propagación de las especies y por su tamaño, debido a que no requieren espacios muy amplios y son ideales en jardines e interiores de casas. Los árboles y arbustos están restringidos a parques, separadores de vías y campus universitarios, donde los espacios son más abiertos.

Tipo de ambiente

La mayor riqueza de especies de plantas ornamentales registradas para cada ambiente en Tunja se encuentran creciendo en el exterior (251); en menor proporción se presentan las plantas de interior (144). Adicionalmente, en la ciudad se encuentran especies

Tabla 4. Número de especies de plantas ornamentales por hábitos de crecimiento

Hábito	N.º de especies	Porcentaje (%)
Árbol	56	13
Arbusto	79	18,4
Enredadera	8	1,9
Hierba	194	45,1
Liana	17	3,7
Suculenta	58	13,5
Sufrutescente	18	4,2

Fuente: elaboración propia.

que pueden crecer tanto en interior como en exterior, las cuales se denominan mixtas (35), como se muestra en la tabla 5. Los géneros más representativos para ambientes de exterior son *Ficus*, *Fuchsia*, *Acacia*, *Dianthus* y *Pelargonium*. En ambientes de interior se destacan *Begonia*, *Euphorbia*, *Bryophyllum* y *Sedum*. Los géneros *Oxalis*, *Citrus* y *Tradescantia* son los más comunes en ambientes mixtos.

En el exterior, los hábitos más representativos son hierbas, arbustos y árboles. En ambientes de interior, los más importantes son las hierbas y las suculentas. Por su parte, en los ambientes mixtos dominaron las especies de hábito herbáceo (tabla 5). En los ambientes de exterior, para hierbas, las familias más representativas son Asteraceae (21 especies) y Iridaceae (6), seguidas de Amaryllidaceae, Caryophyllaceae, Geraniaceae, Plantaginaceae, Poaceae y Solanaceae, con cuatro especies cada una. En hábitos leñosos, las familias más importantes en términos de riqueza son Fabaceae (10 especies), Solanaceae, Myrtaceae y Malvaceae (7 especies cada una), Onagraceae y Moraceae (5 cada una) y Asteraceae (4 especies).

En ambientes de interior, las familias de herbáceas más importantes son Orchidaceae (14 especies), Araceae, Begoniaceae y Bromeliaceae (7 cada una) y Maranthaceae (5). Dentro de suculentas, destacan las familias Cactaceae (18 especies), Crassulaceae (14) y Euphorbiaceae (3). Respecto a las especies que crecen en ambos ambientes (mixtas), las familias de herbáceas más representativas son Asparagaceae, Commelinaceae y Oxalidaceae con tres especies cada una.

Tabla 5. Riqueza de especies ornamentales en cada ambiente para los hábitos de crecimiento registrados en el área de estudio

Hábito	N.º de especies por ambiente			
	Exterior	Interior	Mixta	Total
Árbol	51	-	5	56
Arbusto	66	9	4	79
Enredadera	6	2	-	8
Hierba	88	82	24	194
Liana	15	2	-	17
Suculenta	14	42	2	58
Sufrutescente	11	7	-	18
Total	251	144	35	430

Fuente: elaboración propia.

De las 430 especies ornamentales registradas para Tunja, 12 presentan algún grado de amenaza, de acuerdo con datos de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza³ (IUCN, en inglés); *Brugmansia arborea* (L.) Lagerh. y *Brugmansia sanguinea* (Ruiz & Pav.) D. Don son consideradas como extintas en estado silvestre (EW); tres especies están en la categoría en peligro [EN] (*Bryophyllum daigremontianum* (Raym.-Hamet & H. Perrier) A. Berger, *Pinus radiata* D. Don, *Schefflera elegantissima* (Veitch ex Mast.) Lowry & Frodin); y 7 están clasificadas como vulnerables [VU] (*Armeria maritima* [Mill.] Willd., *Araucaria heterophylla* [Salisb.] Franco, *Dionaea muscipula* J. Ellis, *Hatiora gaertneri* [Regel] Barthlott, *Limonium perezii* [Stapf] F.T. Hubb., *Schlumbergera truncata* [Haw.] Moran, *Retrophyllum rospigiosii* [Pilg.] C.N. Page). De acuerdo con lo observado en la fase de campo, estas especies no son muy comunes; excepto *P. radiata* y *R. rospigiosii*, que se encuentran en parques, campus universitarios y separadores viales de la ciudad.

La ciudad de Tunja cuenta con 114 especies de origen neotropical que se emplean como ornamentales. De acuerdo con la Resolución 1912 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018), del total de estas especies, seis se encuentran con algún grado de

amenaza en el país: *Ceroxylon quindiuense* (H. Karst.) H. Wendl. (Arecaceae), *Juglans neotropica* Diels (Juglandaceae), *Anguloa clowesii* Lindl. (Orchidaceae) y *Cattleya trianae* Linden & Rchb. f. (Orchidaceae), categorizadas como en peligro (EN), y *Quercus humboldtii* Bonpl. (Fagaceae), y *Miltoniopsis vexillaria* (Rchb. f.) God.-Leb. (Orchidaceae), consideradas vulnerables (VU). Las hierbas están representadas con 42,1 % del total de hábitos de crecimiento, los árboles y arbustos con 36,8 % y las suculentas con 13,2 %. Los demás hábitos de crecimiento registran entre 1,7 y 3,5 %. La importancia del cultivo de especies nativas en la ciudad podría favorecer un aumento en la fauna nativa asociada (Sierra & Amarillo, 2014), como es el caso de las Solanáceas, *Brugmansia sanguinea* (Ruiz & Pav.) D. Don, y *Streptosolen jamesonii* (Benth.) Miers, las cuales son polinizadas por colibríes.

CONCLUSIONES

Es recomendable la preferencia por las plantas nativas de uso ornamental para adornar avenidas, parques, campus universitarios y calles de la ciudad, proporcionando a la población espacios sombreados que generen microclimas agradables, contribuyan al mejoramiento de la calidad de vida de las personas, minimicen los efectos de la actividad antrópica y aporten a la conservación de la diversidad local. Lo anterior, teniendo en cuenta que la vegetación nativa tiene fauna asociada a la cual le proporciona alimento y hábitat, y esta, a su vez, realiza la dispersión de semillas y polinización, favoreciendo la ampliación de la cobertura vegetal.

Dentro de las especies de origen neotropical que pueden tener utilidad como cerca viva se encuentran: *Lantana camara* L. (sanguinaria), *Streptosolen jamesonii* (Benth.) Miers (mermelada) y algunas especies de la familia Cactaceae, como plantas trepadoras para muros, *Solanum laxum* Spreng. (manto de maría), y *Solandra maxima* (Moc. & Sessé ex Dunal) P.S. Green (copa de oro). Para separadores viales amplios, campus universitarios y parques destacan: *Schinus molle* L. (muelle), *Yucca gigantea* Lem. (yuca), *Baccharis latifolia* (Ruiz & Pav.) Pers. (chilco), *Vallea stipularis* L.f. (campano, sanjuanito, raque), *Escallonia pendula* (Ruiz & Pav.) Pers. (mangle), *Croton coriaceous* Kunth (sangregrado, drago, croto), *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze (dividivi), *Erythrina rubrinervia* Kunth (chocho), *Senna multiglandulosa* (Jacq.) H.S. Irwin &

3 www.iucnredlist.org

Barneby (alcaparro enano), *Senna viarum* (Little) H.S. Irwin & Barneby (alcaparro gigante), *Quercus humboldtii* Bonpl. (roble), *Juglans neotropica* Diels (cedro nogal), *Lafoensia acuminata* (Ruiz & Pav.) DC. (guayacán de Manizales), *Tibouchina lepidota* (Bonpl.) Baill. (siete cueros), *Cedrela montana* Moritz ex Turcz. (cedro), *Ficus* spp., *Ledenbergia seguierioides* Klotzsch ex Moq. (mil flores), *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C.N. Page (pino colombiano), *Abatia parviflora* Ruiz & Pav. (duraznillo, velitas), *Salix humboldtiana* Willd. (sauce). Para senderos se encuentran: *Canna indica* L. (achira) *Cuphea ignea* A. DC. (cigarrillitos), *Begonia cucullata* var. *hookeri* (A.DC.) L.B.Sm. & B.G.Schub. (pichones), *Duranta erecta* L. (duranta). Para jardines verticales: *Fittonia albivenis* (Lindl. ex Veitch) Brummitt (abre caminos, fitonia) y *Phlebodium aureum* (L.) J. Sm. (helecho blue star). Por último, como tapizantes sobresalen *Erigeron karvinskianus* DC. (margarita, manzanilla), *Centradenia grandifolia* (Schltdl.) Endl. (siete cueros rastrero) y *Calibrachoa* sp. (Calibranchoa).

AGRADECIMIENTOS

A José Manuel Sánchez de Lorenzo por la determinación de algunas plantas. A Daniela Porras y Juliana Montes por la identificación de algunas especies de cactus. A Wilber Ruiz por los aportes y las sugerencias en la toma de fotografías necesarias para la identificación de las especies. A Celeste Montilla por la elaboración del mapa. A Yeimy Olarte por su colaboración en la confirmación de los nombres comunes de algunas plantas. A los viveros y a la comunidad de Tunja por su valioso tiempo, colaboración y cordial atención.

REFERENCIAS

- Alcaldía Mayor de Bogotá (2003). *Beneficios de los árboles en el ambiente urbano*. http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=1ff93b18-ecc1-4d06-a83c-820920dd0408&groupId=10157
- Alcaldía Mayor de Tunja (2012). *Plan de desarrollo municipal 2012-2015. Hechos de verdad. por una Tunja más humana, saludable, segura y sostenible*. Alcaldía Mayor de Tunja.
- Bartholomäus, A., De-la-Rosa, A., Santos, J., Acero, L., & Moosbrugger, W. (1990). *El Manto de la Tierra. Flora de los Andes. Guía de 150 especies de la flora andina*. Lerner.
- Bizberg, A. (2016, marzo 30). *Tierra de cactus. Cienciorama*. <http://www.cienciorama.unam.mx/#!titulo/460/?tierra-de-cactus>
- Brooklyn Botanic Garden (2001). *El jardinero ambiental*. Brooklyn Botanic Garden.
- Bueno, V., & Plumed, J. (2017). *Monografías botánicas. Los Cactus*. Universitat de València.
- Castellanos, C., & Torres, G. (2018). *Orquídeas de Cundinamarca: conservación y aprovechamiento sostenible*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Pontificia Universidad Javeriana, Jardín Botánico de Bogotá "José Celestino Mutis", Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) & Gobernación de Cundinamarca.
- Cheers, G. (ed.). (2006). *Botánica. Guía ilustrada de plantas más de 10.000 especies de la A la Z y cómo cultivarlas*. Könemann.
- Christenhusz, M. J., Reveal, J. L., Farjon, A., Gardner, M. F., Mill, R. R., & Chase, M. W. (2011). A new classification and linear sequence of extant gymnosperms. *Phytotaxa*, 19, 55-70. <http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.19.1.3>
- Christenhusz, M. J., Zhang, X., & Schneider, H. (2011). A linear sequence of extant families and genera of lycophytes and ferns. *Phytotaxa*, 19, 7-54. <http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.19.1.2>
- Del-Vitto, L. A., & Petenatti, E. M. (2015). Asteráceas de importancia económica y ambiental Segunda parte: Otras plantas útiles y nocivas. *Multequina*, 24, 47-74.
- Fariello, F. (2004). *La Arquitectura de los jardines: de la antigüedad al siglo xx* (segunda edición). Reverté S.A.
- Fernández, E. (1990). Las plantas ornamentales oriundas de América. En J. Fernández & I. González, *La agricultura viajera. Cultivos y manufacturas de plantas industriales y alimentarias en España y en la América Virreinal*. Consejo Superior de Investigación. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

- Galvis, H. (2014). *Colores para el jardín tropical: guía de plantas ornamentales* (primera edición). Grijalbo.
- Graf, B. A. (1981). *Tropica: Color cyclopedia of exotic plants and trees* (segunda edición). Roehrs Company East Rutherford.
- Grijalva, A. (2006). *Flora útil etnobotánica de Nicaragua* (primera edición). Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales de Nicaragua.
- Ibarra-Manríquez, G., Cornejo-Tenorio, G., González-Castañeda, N., Piedra-Malagón, E. M., & Luna, A. (2012). El género *Ficus* L. (Moraceae) en México. *Botanical Sciences*, 90(4), 389-452. <https://doi.org/10.17129/botsci.472>
- Infante-Betancour J., Jara-Muñoz A., & Rivera-Díaz, O. (2008). *Árboles y arbustos más frecuentes de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia.
- International Plant Names Index [IPNI]. (2020). *International Plant Names Index*. The Royal Botanic Gardens, Kew, The Harvard University Herbaria & The Australian National Herbarium.
- International Union for Conservation of Nature [IUCN]. 2020. *The IUCN Red List of Threatened Species*. IUCN. <https://www.iucnredlist.org>
- Jiménez, R., & Schubert, B. G. (1997). Begoniaceae. *Flora de Veracruz*, 100, 1-70.
- Judd, W. S., Campbell, C. S., Kellogg, E. A., Stevens, P. F., & Donoghue, M. J. (1999). *Plant systematics: A phylogenetic approach*. Sinauer Associates Inc.
- Mahecha, G., Sánchez, F., Chaparro, J., Cadena, H., Tovar, G., Villota, L., Morales, G., Castro, J. A., Bocanegra, F., & Quintero, M. (2010). *Arbolado urbano de Bogotá. Identificación, descripción y bases para su manejo*. Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Mahecha, G. (2015). *Jardinería urbana de Bogotá: guía ilustrada*. Jardín Botánico de Bogotá "José Celestino Mutis".
- Manrique, L. N., Zuleta, D., Agudelo, A. F., Burgos, S. A., Jerez, D., Mejía, J. D., Pereira, M. P., & Palacio, V. (2014). Floricultura colombiana en contexto: experiencias y oportunidades en Asia pacífico. *Online Journal Mundo Asia Pacífico*, 3(5), 52-79. <https://doi.org/10.17230/map.v3.i5.03>
- Mendoza, H., & Ramírez, B. (2006). *Guía ilustrada de géneros de Melastomataceae y Memecylaceae de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt & Universidad del Cauca.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (2018). *Lista de especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica continental y marino-costera de Colombia. Resolución 1912 de 2017 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. v2.3. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. <https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=resolucion1912-2017mads>
- Molina, L. F., Uribe, E., & Osorio, J. (1998). *Las Flores de los jardines de Santa Fe de Bogotá*. Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Rodríguez, W. (2002). *Helechos, licopodios, selaginelas y equisetos del Parque Regional Arví* (primera edición). CORANTIOQUIA & Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe.
- Sánchez-de-Lorenzo, J. M. (2001). *Guía de las plantas ornamentales*. Mundi-Prensa.
- Sierra-Guerrero, M. C., & Amarillo-Suárez, A. R. (2014). Catálogo de la vegetación en jardines domésticos de Bogotá, Colombia. *Biota Colombiana*, 15(1), 10-46
- Soto, A. (2017). *Guía básica de plantas ornamentales para el diseño de jardines de interior y exterior para clima templado* [tesis de pregrado, Universidad Rafael Landívar]. Repositorio Universidad Rafael Landívar.
- The Catalogue of Life Partnership (2017). *APG IV: Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants* [Data set]. The Catalogue of Life Partnership. <https://www.gbif.org/dataset/fa8ab13c-52ed-4754-b838-aef74c79718>

The Royal Horticultural Society (2000). *Nueva enciclopedia de plantas y flores* (tercera edición). Grijalbo.

Tovar, G. (2007). Manejo del arbolado urbano en Bogotá. *Territorios, 16-17*, 149-173.

Valverde, L., & Hine, A. (2002). Germinación y micropropagación de *Ficus obtusifolia*, *F. jimenezii* y *F. morazaniensis* (Moraceae). *Uniciencia, 19*(1), 77-82.

Villegas, B. (1990). *Colombia, tierra de flores*. Villegas Editores.

Anexo 1. Listado de especies por familia, nombre científico, nombre común y hábito de crecimiento.

(Va desde pág. 68 a pág. 79).

*Especies neotropicales.

**Ab: árbol; Ar: arbusto; Hb: hierba; En: enredadera; Ln: liana; Sc: suculenta; Sf: sufrutescente.

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
ACANTHACEAE	<i>Acanthus mollis</i> L.	Acanto	Hb
ACANTHACEAE	<i>Aphelandra arborea</i> (Mill.) M.R.Almeida *	Afelandra	Sf
ACANTHACEAE	<i>Aphelandra squarrosa</i> Nees	Cebra, afelandra	Sf
ACANTHACEAE	<i>Fittonia albivenis</i> (Lindl. ex Veitch) Brummitt *	Abre caminos, fitonia	Hb
ACANTHACEAE	<i>Hypoestes phyllostachya</i> Baker	Polka	Hb
ACANTHACEAE	<i>Justicia brandegeana</i> Wassh. & L.B.Sm.	Camarón rojo	Sf
ACANTHACEAE	<i>Justicia carnea</i> Lindl. *	Jacobinia, jacobina	Ab
ACANTHACEAE	<i>Pachystachys lutea</i> Nees *	Camarón amarillo	Ab
ACANTHACEAE	<i>Thunbergia alata</i> Bojer ex Sims	Ojo de poeta, susanitas	En
ACANTHACEAE	<i>Thunbergia grandiflora</i> (Roxb. ex Rottl.) Roxb.	Quinceañera	Ln
ACANTHACEAE	<i>Thunbergia mysorensis</i> (Wight) T.Anderson	Cortina china	Ln
ADOXACEAE	<i>Sambucus nigra</i> L.	Sáuco	Ab
AIZOACEAE	<i>Lampranthus deltoides</i> (L.) Glen ex Wijnands	Granizo	Sf
AIZOACEAE	<i>Lampranthus spectabilis</i> (Haw.) N.E. Br.	Brilla a las once	Sf
AIZOACEAE	<i>Mesembryanthemum cordifolium</i> L.f.	Suculenta	Sc
AIZOACEAE	<i>Pleiospilos nelii</i> Schwantes	Cactus de piedra	Sc
ALSTROEMERACEAE	<i>Alstroemeria</i> sp. *	Astromelia	Hb
ALTINGIACEAE	<i>Liquidambar formosana</i> Hance	Ámbar	Ar
AMARANTHACEAE	<i>Celosia argentea</i> L.	Cresta de gallo, plumón	Hb
AMARANTHACEAE	<i>Gomphrena globosa</i> L.	Gonfrena	Hb
AMARANTHACEAE	<i>Iresine diffusa</i> fo. <i>herbstii</i> (Hook.) Pedersen	Amaranto	Hb
AMARYLLIDACEAE	<i>Agapanthus praecox</i> subsp. <i>orientalis</i> F.M.Leight.	Agapanto	Hb
AMARYLLIDACEAE	<i>Caliphruria subdentata</i> Baker *	Billete o billetón	Hb
AMARYLLIDACEAE	<i>Clivia miniata</i> (Lindl.) Bosse	Clivia	Hb
AMARYLLIDACEAE	<i>Crinum x powellii</i> Baker	Azucena blanca	Hb
AMARYLLIDACEAE	<i>Hippeastrum vittatum</i> (L'Hér.) Herb.	Azucena roja	Hb
AMARYLLIDACEAE	<i>Zephyranthes rosea</i> Lindl. *	Lirio de lluvia	Hb
ANACAMPSEROTACEAE	<i>Anacampseros telephiastrum</i> DC.	Suculenta	Hb
ANACARDIACEAE	<i>Schinus molle</i> L. *	Muelle, falso pimiento	Ar
APOCYNACEAE	<i>Adenium obesum</i> (Forssk.) Roem. & Schult.	Flor del desierto	Sc
APOCYNACEAE	<i>Hoya carnosa</i> (L.f.) R.Br.	Hoya	Ln
APOCYNACEAE	<i>Mandevilla boliviensis</i> (Hook.f.) Woodson *	Mandevila	Ln
APOCYNACEAE	<i>Mandevilla sanderi</i> (Hemsl.) Woodson	Diplodemia	Ln

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
APOCYNACEAE	<i>Nerium oleander</i> L.	Adelfa	Ab
APOCYNACEAE	<i>Vinca major</i> L.	Vinca	En
ARACEAE	<i>Aglaonema commutatum</i> Schott	Dólar	Hb
ARACEAE	<i>Anthurium andraeanum</i> Linden ex André *	Anturio	Hb
ARACEAE	<i>Anthurium crassinervium</i> (Jacq.) Schott *	Anturio	Hb
ARACEAE	<i>Anthurium scherzerianum</i> Schott *	Anturio cola de marrano	Hb
ARACEAE	<i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott	Bore, miami	Hb
ARACEAE	<i>Dieffenbachia oerstedii</i> Schott *	Calatea luna	Hb
ARACEAE	<i>Dieffenbachia seguine</i> (Jacq.) Schott *	Cucaracho, diefembaquia	Hb
ARACEAE	<i>Monstera deliciosa</i> Liebm. *	Balazo	Ln
ARACEAE	<i>Philodendron bipinnatifidum</i> Schott ex Endl.	Filodendro	Hb
ARACEAE	<i>Spathiphyllum wallisii</i> Regel	Garcita, espatifilo	Hb
ARACEAE	<i>Syngonium podophyllum</i> Schott *	Singonio	En
ARACEAE	<i>Zantedeschia aethiopica</i> (L.) Spreng.	Cartucho	Hb
ARACEAE	<i>Zantedeschia elliottiana</i> (W.Watson) Engl.	Cartucho amarillo	Hb
ARACEAE	<i>Zantedeschia rehmannii</i> Engl.	Cartucho rosado	Hb
ARALIACEAE	<i>Fatsia japonica</i> (Thunb.) Decne. & Planch.	Arabia	Ab
ARALIACEAE	<i>Hedera helix</i> L.	Hedera, hiedra	Ln
ARALIACEAE	<i>Polyscias scutellaria</i> (Burm.f.) Fosberg	Millonaria	Ab
ARALIACEAE	<i>Schefflera actinophylla</i> (Endl.) Harms	Cheflera	Ar
ARALIACEAE	<i>Schefflera arboricola</i> (Hayata) Merr.	Cheflera árbol	Ab
ARALIACEAE	<i>Schefflera elegantissima</i> (Veitch ex Mast.) Lowry & Frodin	Falsa aralia	Ab
ARAUCARIACEAE	<i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco	Araucaria	Ar
ARECACEAE	<i>Ceroxylon quindiuense</i> (H.Karst.) H.Wendl. *	Palma de cera	Ar
ARECACEAE	<i>Phoenix canariensis</i> Chabaud	Palma	Ar
ARECACEAE	<i>Phoenix roebelenii</i> O'Brien	Palma rivelina	Ab
ARECACEAE	<i>Washingtonia filifera</i> (Linden ex André) H.Wendl. ex de Bary	Washintonia	Ar
ASPARAGACEAE	<i>Agave americana</i> L.	Agave, maguey, pita	Sc
ASPARAGACEAE	<i>Agave attenuata</i> Salm-Dyck	Agave	Sc
ASPARAGACEAE	<i>Albuca bracteata</i> (Thunb.) J.C. Manning & Goldblatt	Planta de la prosperidad	Hb
ASPARAGACEAE	<i>Asparagus densiflorus</i> (Kunth) Jessop	Esparraguera, aspárrago	Hb
ASPARAGACEAE	<i>Asparagus densiflorus</i> var. <i>sprengeri</i> Kunth	Esparraguera, aspárrago	Hb
ASPARAGACEAE	<i>Asparagus setaceus</i> (Kunth) Jessop	Brisa, espuma de mar	Hb
ASPARAGACEAE	<i>Beaucarnea recurvata</i> Lem.	Palma pony, cabeza de indio	Ar
ASPARAGACEAE	<i>Chlorophytum comosum</i> (Thunb.) Jacques	Cinta	Hb
ASPARAGACEAE	<i>Cordyline australis</i> (G.Forst.) Endl.	Yuca	Ar
ASPARAGACEAE	<i>Cordyline fruticosa</i> (L.) A.Chev.	Palma bicolor	Ab
ASPARAGACEAE	<i>Dracaena braunii</i> Engl.	Lucky bamboo	Sf

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
ASPARAGACEAE	<i>Dracaena fragrans</i> (L.) Ker Gawl.	Llanecrey, árbol de la felicidad	Sf
ASPARAGACEAE	<i>Dracaena reflexa</i> Lam.	Canción de la India	Sf
ASPARAGACEAE	<i>Furcraea hexapetala</i> (Jacq.) Urb. *	Fique	Sc
ASPARAGACEAE	<i>Ornithogalum thyrsoides</i> Jacq.	Estrella de David	Hb
ASPARAGACEAE	<i>Sansevieria cylindrica</i> Bojer ex Hook.	Lanza africana	Sc
ASPARAGACEAE	<i>Sansevieria trifasciata</i> Prain	Lengua de suegra	Sc
ASPARAGACEAE	<i>Yucca gigantea</i> Lem. *	Yuca, palma yuca	Ar
ASPHODELACEAE	<i>Aloe arborescens</i> Mill.	Sábila	Sc
ASPHODELACEAE	<i>Aloe vera</i> (L.) Burm.f.	Aloe, sábila	Sc
ASPHODELACEAE	<i>Gasteria acinacifolia</i> (J.Jacq.) Haw.	Suculenta	Sc
ASPHODELACEAE	<i>Haworthia fasciata</i> (Willd.) Haw.	Sábila cebra	Sc
ASPHODELACEAE	<i>Hemerocallis lilioasphodelus</i> L.	Azucena amarilla	Hb
ASPHODELACEAE	<i>Kniphofia uvaria</i> (L.) Oken	Llamas	Hb
ASPHODELACEAE	<i>Phormium tenax</i> J.R.Forst. & G.Forst.	Lino	Hb
ASPLENIACEAE	<i>Asplenium nidus</i> L.	Nido de ave	Hb
ASTERACEAE	<i>Achillea millefolium</i> L.	Milenramas	Hb
ASTERACEAE	<i>Argyranthemum frutescens</i> (L.) Sch. Bip.	Margarita, argirantemon	Ab
ASTERACEAE	<i>Aster amellus</i> L.	Áster	Hb
ASTERACEAE	<i>Baccharis latifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers. *	Chilco	Ab
ASTERACEAE	<i>Calendula officinalis</i> L.	Caléndula	Hb
ASTERACEAE	<i>Callistephus chinensis</i> (L.) Nees	Margarita	Hb
ASTERACEAE	<i>Centaurea cineraria</i> L.	Cineraria marítima	Hb
ASTERACEAE	<i>Chamaemelum nobile</i> (L.) All.	Romana	Hb
ASTERACEAE	<i>Chrysanthemum morifolium</i> Ramat.	Crisantemo	Sf
ASTERACEAE	<i>Coreopsis auriculata</i> L.	Bella Diana	Hb
ASTERACEAE	<i>Dahlia imperialis</i> Roezl ex Ortgies *	Dalia	Hb
ASTERACEAE	<i>Dahlia pinnata</i> Cav.	Dalia	Hb
ASTERACEAE	<i>Erigeron karvinskianus</i> DC. *	Margarita, manzanilla	Hb
ASTERACEAE	<i>Felicia drakensbergensis</i> J.M. Wood & M.S. Evans	Margarita azul	Sf
ASTERACEAE	<i>Gaillardia x grandiflora</i> Hort. ex Van Houtte	Gaillardia	Hb
ASTERACEAE	<i>Gazania rigens</i> (L.) Gaertn.	Gazania	Hb
ASTERACEAE	<i>Gerbera jamesonii</i> Bolus ex Hook.f.	Gerbera	Hb
ASTERACEAE	<i>Helianthus annuus</i> L.	Girasol	Hb
ASTERACEAE	<i>Helichrysum bracteatum</i> (Vent.) Haw.	Inmortal, botón de oro	Hb
ASTERACEAE	<i>Helichrysum petiolare</i> Hilliard & B.L. Burt	Eclipso	Ab
ASTERACEAE	<i>Ismelia carinata</i> (Schousb.) Sch.Bip.	Margarita	Hb
ASTERACEAE	<i>Jacobaea maritima</i> (L.) Pelser & Meijden	Cineraria	Sf
ASTERACEAE	<i>Leucanthemum vulgare</i> (Vaill.) Lam.	Margarita común	Hb
ASTERACEAE	<i>Leucophyta brownii</i> Cass.	Helecho gris, alambrito	Ab
ASTERACEAE	<i>Osteospermum fruticosum</i> (L.) Norl.	Margarita punto azul	Sf

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
ASTERACEAE	<i>Osteospermum jucundum</i> (E. Phillips) Norl.	Margarita punto azul	Sf
ASTERACEAE	<i>Pericallis hybrida</i> (Regel) B. Nord.	Cineraria	Hb
ASTERACEAE	<i>Santolina chamaecyparissus</i> L.	Abrótano hembra	Sf
ASTERACEAE	<i>Senecio niveo aureus</i> Cuatrec. *	Frailejón	Hb
ASTERACEAE	<i>Senecio rowleyanus</i> H. Jacobsen	Rosario, camándula	Sc
ASTERACEAE	<i>Senecio tamoides</i> DC.	Lluvia de oro, estrella de David	Ln
ASTERACEAE	<i>Silybum marianum</i> (L.) Gaertn.	Cardosanto	Hb
ASTERACEAE	<i>Smallanthus pyramidalis</i> (Triana) H. Rob. *	Arboloco	Ar
ASTERACEAE	<i>Tagetes erecta</i> L. *	Tagetes	Hb
ASTERACEAE	<i>Tagetes lucida</i> Cav. *	Anís	Hb
ASTERACEAE	<i>Zinnia peruviana</i> (L.) L. *	Zinia	Hb
BALSAMINACEAE	<i>Impatiens sodenii</i> Engl. & Warb.	Tres estrellas	Sc
BALSAMINACEAE	<i>Impatiens walleriana</i> Hook. f.	Bella helena, guinea	Sc
BEGONIACEAE	<i>Begonia boliviensis</i> A.DC. *	Begonia santa cruz	Hb
BEGONIACEAE	<i>Begonia bowerae</i> Ziesenh. *	Piel de sapo	Hb
BEGONIACEAE	<i>Begonia cucullata</i> var. <i>hookeri</i> (A.DC.) L.B.Sm. & B.G.Schub.*	Pichones	Hb
BEGONIACEAE	<i>Begonia foliosa</i> Kunth *	Begonia	Sf
BEGONIACEAE	<i>Begonia maculata</i> Raddi *	Ala de ángel	Sf
BEGONIACEAE	<i>Begonia masoniana</i> Irmsch. ex Ziesenh.	Begonia cruz de hierro	Hb
BEGONIACEAE	<i>Begonia reniformis</i> Dryand.	Begonia elatior	Hb
BEGONIACEAE	<i>Begonia rex</i> Putz.	Begonia rex	Hb
BEGONIACEAE	<i>Begonia x tuberhybrida</i> Voss *	Begonia tuberosa	Hb
BETULACEAE	<i>Alnus acuminata</i> Kunth *	Aliso	Ar
BIGNONIACEAE	<i>Pandorea jasminoides</i> (Lindl.) K. Schum.	Bignonia blanca	Ln
BIGNONIACEAE	<i>Pyrostegia venusta</i> (Ker Gawl.) Miers	Tango	Ln
BIGNONIACEAE	<i>Tanaecium pyramidatum</i> (Rich.) L.G. Lohmann *	-	Ln
BIGNONIACEAE	<i>Tecoma capensis</i> (Thunb.) Lindl.	Tecomaria	Ab
BIGNONIACEAE	<i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth	Chirlobirlo, chicalá	Ar
BORAGINACEAE	<i>Cynoglossum amabile</i> Stapf & J.R. Drumm.	Miosotis de China	Hb
BRASSICACEAE	<i>Brassica oleracea</i> L.	Col de jardín	Hb
BRASSICACEAE	<i>Lobularia maritima</i> (L.) Desv.	Reseda	Hb
BRASSICACEAE	<i>Matthiola incana</i> (L.) R.Br.	Alhelí	Hb
BROMELIACEAE	<i>Aechmea calyculata</i> (E.Morren) Baker	Bromelia, quiche, guiche	Hb
BROMELIACEAE	<i>Aechmea fasciata</i> (Lindl.) Baker	Bromelia, quiche, guiche	Hb
BROMELIACEAE	<i>Guzmania claviformis</i> H.E. Luther *	Bromelia, quiche, guiche	Hb
BROMELIACEAE	<i>Neoregelia carolinae</i> (Beer) L.B. Sm. *	Bromelia, quiche, guiche	Hb
BROMELIACEAE	<i>Tillandsia cyanea</i> Linden ex K.Koch *	Bromelia, quiche, guiche	Hb
BROMELIACEAE	<i>Tillandsia leiboldiana</i> Schtdl. *	Bromelia, quiche, guiche	Hb
BROMELIACEAE	<i>Vriesea splendens</i> (Brongn.) Lem.	Bromelia, quiche, guiche	Hb

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
CACTACEAE	<i>Acanthocereus tetragonus</i> (L.) Hummelinck *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Austrocylindropuntia cylindrica</i> (Lam.) Backeb. *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Austrocylindropuntia subulata</i> (Muehlenpf.) Backeb.*	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Browningia hernandezii</i> Fern.Alonso *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Cereus hexagonus</i> (L.) Mill. *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Cylindropuntia</i> sp.	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Epiphyllum</i> sp. *	Pitaya	Sc
CACTACEAE	<i>Gymnocalycium mihanovichii</i> (Frič & Gürke) Britton & Rose	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Hatiora gaertneri</i> (Regel) Barthlott	Cactus de navidad	Sc
CACTACEAE	<i>Hylocereus</i> sp. *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Mammillaria mammillaris</i> (L.) H.Karst. *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Melocactus</i> sp. *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Opuntia caracasana</i> Salm-Dyck *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Opuntia microdasys</i> (Lehm.) Pfeiff.	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Opuntia microdasys</i> subsp. <i>rufida</i> (Engelm.) U. Guzmán & Mandujano	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Opuntia pubescens</i> H.L. Wendl. ex Pfeiff. *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Pilosocereus lanuginosus</i> (L.) Byles & G.D.Rowley	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Schlumbergera truncata</i> (Haw.) Moran	Cactus de navidad, filocactus	Sc
CACTACEAE	<i>Stenocereus griseus</i> (Haw.) Buxb. *	Cactus	Sc
CACTACEAE	<i>Trichocereus</i> sp. *	Cactus	Sc
CALCEOLARIACEAE	<i>Calceolaria x herbeohybrida</i> Voss.	Carrielitos, globitos	Hb
CAMPANULACEAE	<i>Campanula isophylla</i> Moretti	Estrella de Italia, campanilla	Hb
CAMPANULACEAE	<i>Lobelia erinus</i> L.	Zulias	Hb
CANNACEAE	<i>Canna indica</i> L. *	Achira	Hb
CAPRIFOLIACEAE	<i>Lonicera japonica</i> Thunb.	Madre selva	Ln
CAPRIFOLIACEAE	<i>Scabiosa atropurpurea</i> L.	Alfiletero, cardo	Hb
CARYOPHYLLACEAE	<i>Dianthus barbatus</i> L.	Clavel de poeta	Hb
CARYOPHYLLACEAE	<i>Dianthus caryophyllus</i> L.	Clavel común	Hb
CARYOPHYLLACEAE	<i>Dianthus chinensis</i> L.	Clavelina	Hb
CARYOPHYLLACEAE	<i>Dianthus gratianopolitanus</i> Vill.	Clavelina	Hb
CASUARINACEAE	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	Pino australiano	Hb
CELASTRACEAE	<i>Euonymus japonicus</i> Thunb.	Evónimo del japon, evónimo	Ab
CLUSIACEAE	<i>Clusia orthoneura</i> Standl. *	Clusia	Ab
COMMELINACEAE	<i>Tradescantia fluminensis</i> Vell.	Cinta	Hb
COMMELINACEAE	<i>Tradescantia pallida</i> (Rose) D.R. Hunt	Purpurina	Hb

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
COMMELINACEAE	<i>Tradescantia zebrina</i> Bosse	Suelda consuelda, panameña	Hb
CONVOLVULACEAE	<i>Convolvulus tricolor</i> L.	Campanilla, don Diego del día	En
CONVOLVULACEAE	<i>Ipomoea purpurea</i> (L.) Roth	Campanilla	En
CRASSULACEAE	<i>Aeonium arboreum</i> Webb & Berthel.	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Aeonium canariense</i> (L.) Webb & Berthel.	Chupahuevo	Sc
CRASSULACEAE	<i>Aeonium tabuliforme</i> (Haw.) Webb & Berthel.	Rosa de Jericó	Sc
CRASSULACEAE	<i>Bryophyllum daigremontianum</i> (Raym.-Hamet & H.Perrier) A. Berger	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Bryophyllum delagoense</i> (Eckl. & Zeyh.) Druce	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Bryophyllum fedtschenkoi</i> (Raym.-Hamet & H. Perrier) Lauz.-March.	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Bryophyllum pinnatum</i> (Lam.) Oken	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Cotyledon orbiculata</i> L.	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Crassula capitella</i> subsp. <i>thyrsiflora</i> (Thunb.) Toelken	Estrella ninja	Sc
CRASSULACEAE	<i>Crassula multicava</i> Lem.	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Crassula ovata</i> (Mill.) Druce	Bastoncito, orejas de shrek	Sc
CRASSULACEAE	<i>Echeveria grandiflora</i> Haw.	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Echeveria pallida</i> E.Walther	Rosa verde	Sc
CRASSULACEAE	<i>Kalanchoe blossfeldiana</i> Poelln.	Coralitos	Sc
CRASSULACEAE	<i>Kalanchoe tomentosa</i> Baker	Orejas de conejo	Sc
CRASSULACEAE	<i>Sedum lineare</i> Thunb.	Uña de señorita	Sc
CRASSULACEAE	<i>Sedum morganianum</i> E.Walther	Trenzas de María	Sc
CRASSULACEAE	<i>Sedum palmeri</i> S. Watson	Suculenta	Sc
CRASSULACEAE	<i>Sedum rubrotinctum</i> R.T. Clausen	Platanito, bananito	Sc
CUPRESSACEAE	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill.*	Pino ciprés	Ar
CUPRESSACEAE	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartw.	Cedro limón	Ar
CUPRESSACEAE	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	Pino vela	Ar
CUPRESSACEAE	<i>Juniperus squamata</i> Buch.-Ham. ex D.Don	Pino san José	Ab
CUPRESSACEAE	<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco	Pino libro	Ab
CYCADACEAE	<i>Cycas rumphii</i> Miq.	Palma cica, espina de pescado	Hb
CYPERACEAE	<i>Cyperus involucratus</i> Rottb.	Papiro chino	Hb
CYPERACEAE	<i>Cyperus papyrus</i> L.	Papiro, papiro de los egipcios	Hb
DAVALLIACEAE	<i>Davallia canariensis</i> (L.) Sm.	Cola de mono	Hb
DROSERACEAE	<i>Dionaea muscipula</i> J. Ellis	Venus	Hb
DROSERACEAE	<i>Drosera capensis</i> L.	Atrapamoscas	Hb
DROSERACEAE	<i>Drosera glabripes</i> (Harv. ex Planch.) Stein	Atrapamoscas	Hb

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
ELAEOCARPACEAE	<i>Vallea stipularis</i> L.f. *	Campano, sanjuanito, raque	Ar
ERICACEAE	<i>Rhododendron simsii</i> Planch.	Azalea	Ab
ESCALLONIACEAE	<i>Escallonia pendula</i> (Ruiz & Pav.) Pers. *	Mangle	Ar
ESCALLONIACEAE	<i>Escallonia polifolia</i> Hook.	Tibar	Ab
EUPHORBIACEAE	<i>Acalypha chamaedrifolia</i> (Lam.) Müll. Arg.	Churrusquitos, gusanitos	Sf
EUPHORBIACEAE	<i>Acalypha wilkesiana</i> Müll.Arg.	Millón tailandés	Ab
EUPHORBIACEAE	<i>Codiaeum variegatum</i> (L.) Rumph. ex A. Juss.	Croto variegado, colorama	Ab
EUPHORBIACEAE	<i>Croton coriaceus</i> Kunth *	Sangregrado, drago, croto	Ar
EUPHORBIACEAE	<i>Euphorbia cotinifolia</i> L. *	Lechero rojo	Ab
EUPHORBIACEAE	<i>Euphorbia milii</i> Des Moul.	Corona de espinas	Ab
EUPHORBIACEAE	<i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. ex Klotzsch	Navidad, sombrilla japonesa	Ab
EUPHORBIACEAE	<i>Euphorbia tirucalli</i> L.	Árbol desnudo	Sc
EUPHORBIACEAE	<i>Euphorbia tithymaloides</i> L.	Bítamo	Sc
EUPHORBIACEAE	<i>Euphorbia trigona</i> Mill.	Cactus	Sc
EUPHORBIACEAE	<i>Ricinus communis</i> L.	Ricino, higuero	Ab
FABACEAE	<i>Acacia baileyana</i> F. Muell.	Acacia morada	Ar
FABACEAE	<i>Acacia longifolia</i> (Andrews) Willd.	Acacia	Ar
FABACEAE	<i>Acacia mearnsii</i> De Wild.	Acacia	Ar
FABACEAE	<i>Acacia melanoxylon</i> R. Br.	Acacia japonesa	Ar
FABACEAE	<i>Caesalpinia spinosa</i> (Molina) Kuntze *	Dividivi	Ar
FABACEAE	<i>Erythrina rubrinervia</i> Kunth *	Chocho	Ar
FABACEAE	<i>Inga</i> sp.	Guamo	Ar
FABACEAE	<i>Lotus berthelotii</i> Masf.	Manto de gitana	Hb
FABACEAE	<i>Paraserianthes lophantha</i> (Willd.) I.C.Nielsen	Acacia bracinga	Ar
FABACEAE	<i>Senna multiglandulosa</i> (Jacq.) H.S. Irwin & Barneby *	Alcaparro enano	Ar
FABACEAE	<i>Senna viarum</i> (Little) H.S. Irwin & Barneby *	Alcaparro gigante	Ar
FAGACEAE	<i>Quercus humboldtii</i> Bonpl. *	Roble	Ar
GERANIACEAE	<i>Pelargonium x domesticum</i> L.H. Bailey	Geranio	Hb
GERANIACEAE	<i>Pelargonium odoratissimum</i> (L.) L'Hér.	Aroma	Hb
GERANIACEAE	<i>Pelargonium peltatum</i> (L.) L'Hér.	Hiedra	Hb
GERANIACEAE	<i>Pelargonium zonale</i> (L.) L'Hér. ex Aiton	Novios	Hb
GESNERIACEAE	<i>Kohleria amabilis</i> var. <i>bogotensis</i> (G. Nicholson) L.P. Kvist & L.E. Skog *	Coleria	Hb
GESNERIACEAE	<i>Nematanthus gregarius</i> D.L. Denham	Pescaditos	Hb
GESNERIACEAE	<i>Saintpaulia ionantha</i> H. Wendl.	Violeta africana	Hb
GESNERIACEAE	<i>Sinningia speciosa</i> (Lodd.) Hiern	Gloxinia	Hb
HAEMODORACEAE	<i>Anigozanthos flavidus</i> DC.	Anizogantos	Hb
HYDRANGEACEAE	<i>Hydrangea macrophylla</i> (Thunb.) Ser.	Hortensia	Hb

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
HYPERICACEAE	<i>Hypericum patulum</i> Thunb.	Hipérico	Ab
IRIDACEAE	<i>Crocoshia x crocosmiiflora</i> (Lemoine) N.E. Br.	Chispita	Hb
IRIDACEAE	<i>Dietes bicolor</i> (Steud.) Sweet ex Klatt	Iris africano	Hb
IRIDACEAE	<i>Freesia refracta</i> (Jacq.) Klatt	Nardo	Hb
IRIDACEAE	<i>Gladiolus x hybridus</i> C. Morren	Gladiolo	Hb
IRIDACEAE	<i>Iris x germanica</i> L.	Lirio barbudo	Hb
IRIDACEAE	<i>Iris japonica</i> Thunb.	Flor de mariposa	Hb
JUGLANDACEAE	<i>Juglans neotropica</i> Diels *	Nogal, cedro nogal	Ar
LAMIACEAE	<i>Clerodendrum thomsoniae</i> Balf.f.	Corazón herido	En
LAMIACEAE	<i>Lamium galeobdolon</i> (L.) L.	Aluminio	En
LAMIACEAE	<i>Plectranthus madagascariensis</i> (Pers.) Benth.	Incienso	Hb
LAMIACEAE	<i>Plectranthus parviflorus</i> Willd.	Planta del dinero	Hb
LAMIACEAE	<i>Plectranthus scutellarioides</i> (L.) R. Br.	Pompaduro	Hb
LAMIACEAE	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Romero	Ab
LAMIACEAE	<i>Salvia leucantha</i> Cav.	Salvia	Hb
LAMIACEAE	<i>Salvia splendens</i> Sellow ex Schult.	Liberales, salvia	Hb
LAMIACEAE	<i>Stachys byzantina</i> K. Koch	Hierbas de la perlesía	Hb
LAMIACEAE	<i>Westringia fruticosa</i> (Willd.) Druce	Romero australiano	Ab
LILIACEAE	<i>Lilium candidum</i> L.	Lirio	Hb
LYTHRACEAE	<i>Cuphea ignea</i> A. DC. *	Cigarrillitos	Hb
LYTHRACEAE	<i>Lafoensia acuminata</i> (Ruiz & Pav.) DC. *	Guayacán de Manizales	Ar
LYTHRACEAE	<i>Punica granatum</i> L.	Granado	Ab
MAGNOLIACEAE	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	Tulipero	Ar
MAGNOLIACEAE	<i>Magnolia grandiflora</i> L.	Magnolia	Ar
MALVACEAE	<i>Abutilon hybridum</i> Voss	Abutilón	Ab
MALVACEAE	<i>Abutilon megapotamicum</i> (A.Spreng.) A.St.-Hil. & Naudin	Farolitos	Ab
MALVACEAE	<i>Abutilon pictum</i> (Gillies ex Hook.) Walp. *	Abutilón variegado	Ab
MALVACEAE	<i>Alcea rosea</i> L.	Malva	Hb
MALVACEAE	<i>Anisodonteia capensis</i> (L.) D.M. Bates	Malva imperial, malvastro	Ab
MALVACEAE	<i>Grewia glandulosa</i> Vahl	-	Ab
MALVACEAE	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L.	Cayeno	Ab
MALVACEAE	<i>Malvaviscus penduliflorus</i> Moc. & Sessé ex DC.	Malvavisco	Ab
MARANTACEAE	<i>Calathea zebrina</i> (Sims) Lindl.	Calatea pana, cola de lapa	Hb
MARANTACEAE	<i>Ctenanthe setosa</i> (Roscoe) Eichler	Diez mandamientos	Hb
MARANTACEAE	<i>Goepertia makoyana</i> (E. Morren) Borchs. & S. Suárez	Calatea papelito	Hb
MARANTACEAE	<i>Goepertia roseopicta</i> (Linden) Borchs. & S. Suárez	Medallón	Hb
MARANTACEAE	<i>Maranta leuconeura</i> E. Morren	Soldaditos	Hb
MELASTOMATAACEAE	<i>Centradenia grandifolia</i> (Schltdl.) Endl. *	Siete cueros rastrero	Hb
MELASTOMATAACEAE	<i>Meriania nobilis</i> Triana *	Amarrabollo	Ab

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
MELASTOMATACEAE	<i>Tibouchina lepidota</i> (Bonpl.) Baill. *	Siete cueros	Ab
MELIACEAE	<i>Cedrela montana</i> Moritz ex Turcz. *	Cedro	Ar
MORACEAE	<i>Ficus benjamina</i> L.	Ficus variegado, ficus	Ar
MORACEAE	<i>Ficus elastica</i> Roxb. ex Hornem.	Ficus de caucho, caucho	Ar
MORACEAE	<i>Ficus pumila</i> L.	Ficus trepador, ficus rastrero	Ln
MORACEAE	<i>Ficus soatensis</i> Dugand *	Caucho	Ar
MORACEAE	<i>Ficus tequendamae</i> Dugand *	Caucho	Ar
MORACEAE	<i>Ficus velutina</i> Humb. & Bonpl. ex Willd. *	Caucho	Ar
MYRTACEAE	<i>Callistemon citrinus</i> (Curtis) Skeels	Limpiatubos	Ab
MYRTACEAE	<i>Callistemon viminalis</i> (Sol. ex Gaertn.) G. Don	Limpiatubos, árbol llorón	Ab
MYRTACEAE	<i>Corymbia ficifolia</i> (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson	Eucalipto	Ar
MYRTACEAE	<i>Eucalyptus cinerea</i> F. Muell. ex Benth.	Eucalipta hembra	Ar
MYRTACEAE	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	Eucalipto	Ar
MYRTACEAE	<i>Leptospermum scoparium</i> J.R. Forst. & G. Forst.	Electrospermo, rosa china	Ab
MYRTACEAE	<i>Syzygium paniculatum</i> Gaertn.	Eugenia	Ab
NEPENTHACEAE	<i>Nepenthes</i> sp.	Nepentes	Hb
NEPHROLEPIDACEAE	<i>Nephrolepis cordifolia</i> (L.) C. Presl	Helecho peine	Hb
NEPHROLEPIDACEAE	<i>Nephrolepis exaltata</i> (L.) Schott	Helecho Boston	Hb
NEPHROLEPIDACEAE	<i>Nephrolepis exaltata</i> var. <i>bostoniensis</i> Davenp.	Helecho Boston	Hb
NYCTAGINACEAE	<i>Bougainvillea glabra</i> Choisy	Buganvil	Ln
NYCTAGINACEAE	<i>Mirabilis jalapa</i> L. *	Don Diego de noche	Ab
OLEACEAE	<i>Fraxinus chinensis</i> Roxb.	Urapán, fresno	Ar
OLEACEAE	<i>Jasminum polyanthum</i> Franch.	Jazmín	Ln
OLEACEAE	<i>Ligustrum japonicum</i> Thunb.	Aligustre	Ab
OLEACEAE	<i>Ligustrum lucidum</i> W.T. Aiton	Ligustro, manzano de jardín	Ab
OLEACEAE	<i>Olea europaea</i> L.	Olivo	Ab
ONAGRACEAE	<i>Fuchsia corymbiflora</i> Ruiz & Pav.	Zarcillejo, fucsia arbustiva	Ab
ONAGRACEAE	<i>Fuchsia magellanica</i> Lam.	Fucsia, zarcillo	Ab
ONAGRACEAE	<i>Fuchsia microphylla</i> Kunth	Zarcillo mini	Ab
ONAGRACEAE	<i>Fuchsia triphylla</i> L. *	Fucsia, zarcillo	Ab
ONAGRACEAE	<i>Fuchsia x hybrida</i> Voss	Fucsia, zarcillo	Ab
ORCHIDACEAE	<i>Acineta superba</i> (Kunth) Rchb. f. *	Toritós	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Anguloa clowesii</i> Lindl. *	Cuna de venus, orquídea tulipán	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Arundina graminifolia</i> (D. Don) Hochr.	Orquídea bambú, arundina	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Cattleya trianae</i> Linden & Rchb. f. *	Flor de mayo	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Cattleya x hybrida</i> H.J. Veitch *	Flor de mayo	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Epidendrum</i> sp. *	Orquídea	Hb

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
ORCHIDACEAE	<i>Masdevallia</i> sp. *	Masdevalia	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Maxillaria</i> sp. *	Orquídea	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Miltoniopsis vexillaria</i> (Rchb. f.) God.-Leb. *	Josefina	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Oncidium alexandrae</i> (Bateman) M.W. Chase & N.H. Williams *	Orquídea	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Oncidium</i> sp. *	Lluvia de estrellas	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Paphiopedilum</i> sp.	Zapatico de Obispo	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Phalaenopsis</i> sp.	Falenopsis	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Phragmipedium</i> sp. *	Zapaticos	Hb
ORCHIDACEAE	<i>Trichocentrum</i> sp.	Orquídea	Hb
OXALIDACEAE	<i>Biophytum dendroides</i> (Kunth) DC.	-	Hb
OXALIDACEAE	<i>Oxalis articulata</i> Savigny	Trébol	Hb
OXALIDACEAE	<i>Oxalis corniculata</i> L.	Trébol	Hb
OXALIDACEAE	<i>Oxalis purpurea</i> L.	Trébol holandés	Hb
OXALIDACEAE	<i>Oxalis spiralis</i> Ruiz & Pav. ex G. Don	Trébol morado	Sc
OXALIDACEAE	<i>Oxalis triangularis</i> A. St.-Hil.	Trébol ecuatoriano	Hb
PAPAVERACEAE	<i>Eschscholzia californica</i> Cham.	Amapola dorada	Hb
PAPAVERACEAE	<i>Papaver somniferum</i> L.	Amapola	Hb
PHYTOLACCACEAE	<i>Ledenbergia seguierioides</i> Klotzsch ex Moq. *	Mil flores	Ab
PINACEAE	<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	Pino	Ar
PINACEAE	<i>Pinus radiata</i> D. Don	Pino	Ar
PIPERACEAE	<i>Peperomia argyreia</i> (Miq.) E. Morren *	Concha	Hb
PIPERACEAE	<i>Peperomia caperata</i> Yunck.	Arrugitas	Hb
PIPERACEAE	<i>Peperomia obtusifolia</i> (L.) A. Dietr.	Espejuelos, cucharitas	Hb
PIPERACEAE	<i>Peperomia rotundifolia</i> (L.) Kunth	Centavitos	Hb
PITTOSPORACEAE	<i>Pittosporum undulatum</i> Vent.	Jazmín	Ar
PLANTAGINACEAE	<i>Antirrhinum majus</i> L.	Dragones, perritos	Hb
PLANTAGINACEAE	<i>Cymbalaria muralis</i> G. Gaertn., B. Mey. & Scherb.	Palomilla del muro	Hb
PLANTAGINACEAE	<i>Hebe</i> sp.	Hebe	Hb
PLANTAGINACEAE	<i>Penstemon</i> sp.	Dedalera	Hb
PLUMBAGINACEAE	<i>Armeria maritima</i> (Mill.) Willd.	Globito	Hb
PLUMBAGINACEAE	<i>Limonium perezii</i> (Stapf) F.T. Hubb.	Siempreviva, limonión	Hb
PLUMBAGINACEAE	<i>Plumbago auriculata</i> Lam.	Jazmín azul	Ab
POACEAE	<i>Antheophora hermaphrodita</i> (L.) Kuntze	Penisetum	Hb
POACEAE	<i>Arundo donax</i> L.	Cañabrava	Hb
POACEAE	<i>Cenchrus setaceus</i> (Forssk.) Morrone	Penisetum	Hb
POACEAE	<i>Cortaderia selloana</i> (Schult. & Schult. f.) Asch. & Graebn.	Plumón silvestre	Hb
POACEAE	<i>Phyllostachys aurea</i> Rivière & C. Rivière	Bambú ornamental, chusque	Ab
PODOCARPACEAE	<i>Retrophyllum rospigliosii</i> (Pilg.) C.N. Page *	Pino colombiano	Ar

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
POLYGALACEAE	<i>Polygala myrtifolia</i> L.	Polígala	Ab
POLYGONACEAE	<i>Persicaria capitata</i> (Buch.-Ham. ex D.Don) H.Gross	Nudosilla	Hb
POLYPODIACEAE	<i>Microsorium punctatum</i> (L.) Copel.	Helecho lechuga	Hb
POLYPODIACEAE	<i>Phlebodium aureum</i> (L.) J. Sm. *	Helecho <i>blue star</i>	Hb
POLYPODIACEAE	<i>Platycerium bifurcatum</i> (Cav.) C.Ch.	Cacho de venado	Hb
POLYPODIACEAE	<i>Schellolepis subauriculata</i> (Blume) J. Sm.	Helecho cortina	Hb
PRIMULACEAE	<i>Anagallis arvensis</i> L.	Anagallo	Hb
PRIMULACEAE	<i>Cyclamen persicum</i> Mill.	Violeta de los Alpes	Hb
PRIMULACEAE	<i>Primula obconica</i> Hance	Primula	Hb
PROTEACEAE	<i>Grevillea robusta</i> A. Cunn. ex R. Br.	Roble australiano, rabo de pavo	Ar
PTERIDACEAE	<i>Adiantum raddianum</i> C. Presl	Cilantrillo, culantrillo	Hb
ROSACEAE	<i>Cotoneaster pannosus</i> Franch.	Joli rojo	Ab
ROSACEAE	<i>Photinia x fraseri</i> Dress	Fotinia	Ab
ROSACEAE	<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	Cereza	Ar
ROSACEAE	<i>Pyracantha angustifolia</i> (Franch.) C.K. Schneid.	Piracanta, joli naranja, mortiño	Ab
ROSACEAE	<i>Rosa</i> sp.	Rosa	Sf
RUBIACEAE	<i>Coffea arabica</i> L.	Café	Ab
RUBIACEAE	<i>Gardenia jasminoides</i> J.Ellis	Gardenia	Ab
RUTACEAE	<i>Coleonema album</i> (Thunb.) Bartl. & H.L. Wendl.	Diosme	Ab
RUTACEAE	<i>Citrus x limon</i> (L.) Osbeck	Limón	Ar
RUTACEAE	<i>Citrus reticulata</i> Blanco	Mandarina	Ar
RUTACEAE	<i>Citrus x aurantium</i> L.	Naranja	Ar
SALICACEAE	<i>Abatia parviflora</i> Ruiz & Pav. *	Duraznillo, velitas	Ab
SALICACEAE	<i>Populus nigra</i> L.	Álamo	Ar
SALICACEAE	<i>Salix humboldtiana</i> Willd. *	Sauce	Ar
SALICACEAE	<i>Salix viminalis</i> L.	Mimbre	Ab
SALICACEAE	<i>Xylosma spiculifera</i> (Tul.) Triana & Planch. *	Corono	Ab
SAPINDACEAE	<i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.	Hayuelo	Ab
SAXIFRAGACEAE	<i>Bergenia crassifolia</i> (L.) Fritsch	Bergenia	Hb
SAXIFRAGACEAE	<i>Heuchera sanguinea</i> Engelm.	Flor de coral	Hb
SAXIFRAGACEAE	<i>Tolmiea menziesii</i> (Pursh) Torr. & A. Gray	Mil hojas	Hb
SCROPHULARIACEAE	<i>Buddleja davidii</i> Franch.	Arbustos de las mariposas	Ab
SCROPHULARIACEAE	<i>Chaenostoma cordatum</i> (Thunb.) Benth.	Estrella de san José	Hb
SCROPHULARIACEAE	<i>Verbascum virgatum</i> Stokes	Vara de san José	Hb
SELAGINELLACEAE	<i>Selaginella martensii</i> Spring	Helecho cola de pavo	Hb
SOLANACEAE	<i>Brugmansia arborea</i> (L.) Steud.*	Borrachero	Ab
SOLANACEAE	<i>Brugmansia sanguinea</i> (Ruiz & Pav.) D.Don *	Borrachero rojo	Ar
SOLANACEAE	<i>Brunfelsia pauciflora</i> (Cham. & Schltdl.) Benth. *	Jazmín lavanda	Ab
SOLANACEAE	<i>Calibrachoa</i> sp. *	Calibrancha	Hb

Familia	Nombre científico	Nombre común	Hábito**
SOLANACEAE	<i>Capsicum annuum</i> L. *	Ají ornamental	Hb
SOLANACEAE	<i>Cestrum nocturnum</i> L.	Galán de la noche	Ab
SOLANACEAE	<i>Lochroma gesnerioides</i> (Kunth) Miers *	Sarcillejo	Ab
SOLANACEAE	<i>Lycianthes lycioides</i> (L.) Hassl. *	Gurrubo	Ab
SOLANACEAE	<i>Nicandra physalodes</i> (L.) Gaertn. *	Uchuva de perro	Hb
SOLANACEAE	<i>Nicotiana tabacum</i> L. *	Tabaco	Hb
SOLANACEAE	<i>Petunia hybrida</i> Vilm.	Petunia	Hb
SOLANACEAE	<i>Solandra maxima</i> (Moc. & Sessé ex Dunal) P.S.Green*	Copa de oro	Ln
SOLANACEAE	<i>Solanum pseudocapsicum</i> L.	Mirto	Ab
SOLANACEAE	<i>Solanum laxum</i> Spreng. *	Manto de maría	Ln
SOLANACEAE	<i>Streptosolen jamesonii</i> (Benth.) Miers *	Mermelada	Ab
THEACEAE	<i>Camellia japonica</i> L.	Camelia, rosa camelia	Ab
TROPAEOLACEAE	<i>Tropaeolum majus</i> L. *	Nabo, capuchinas	En
URTICACEAE	<i>Pilea cadierei</i> Gagnep. & Guillaumin	Planta de aluminio	Ab
URTICACEAE	<i>Pilea involucrata</i> (Sims) C.H.Wright & Dewar *	Pilea	Hb
URTICACEAE	<i>Pilea microphylla</i> (L.) Liebm. *	Paletaria	Hb
URTICACEAE	<i>Soleirolia soleirolii</i> (Req.) Dandy	Lágrimas de bebé	Hb
VERBENACEAE	<i>Duranta erecta</i> L. *	Duranta	Ab
VERBENACEAE	<i>Lantana camara</i> L. *	Sanguinaria	Ab
VERBENACEAE	<i>Glandularia x hybrida</i> (Groenl. & Rümpler) G.L. Nesom & Pruski *	Verbena	Hb
VIOLACEAE	<i>Viola tricolor</i> L.	Pensamientos	Hb

Análisis de viabilidad y diseño para el abastecimiento de agua potable en la vereda Socotá del municipio de Apulo (Cundinamarca, Colombia)

Feasibility Analysis and Design of a Drinking Water Supply System in the Village of Socotá, Municipality of Apulo (Cundinamarca, Colombia)

Andrea Tatiana Jaime Bello

Programa de Ingeniería Ambiental, Grupo de investigación Tecnoambiental,
Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-3404-6579> | andreat-jaimeb@unilibre.edu.co

Jenny Alejandra Martínez Jiménez

Programa de Ingeniería Ambiental, Grupo de investigación Tecnoambiental,
Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-2988-3463> | andreat-jaimeb@unilibre.edu.co

Jesús Ernesto Torres Quintero

Programa de Ingeniería Ambiental, Grupo de investigación Tecnoambiental,
Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-1611-3707> | jesuse.torresq@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 22 de abril de 2020

Fecha de aceptación: 30 de junio de 2020

Sugerencia de citación: Jaime-Bello, A. T., Martínez-Jiménez, J. A. y Torres-Quintero, J. E. (2020). Análisis de viabilidad y diseño para el abastecimiento de agua potable en la vereda Socotá del municipio de Apulo (Cundinamarca, Colombia). *Mutis*, 10(1), 79-96. doi: 10.21789/22561498.1604

RESUMEN

El deficiente desarrollo infraestructural en materia de agua potable y saneamiento básico en las zonas rurales de Colombia ha repercutido en la insatisfacción de las necesidades básicas de sus habitantes. Por lo anterior, esta investigación realiza la validación de los criterios fundamentales para el

diseño de un sistema que permita abastecer de agua potable a la vereda Socotá, municipio de Apulo, aplicando metodologías como el método inverso a la distancia (IDW) para la determinación de la precipitación, el método de Thornthwaite para el cálculo de la evapotranspiración, el método geométrico para la proyección poblacional y la validación del cumplimiento de criterios para la selección de la opción de abastecimiento más viable, para su posterior diseño mediante las ecuaciones de Hazen-Williams. A partir de dichos métodos fue posible identificar una precipitación de 1.101-1.156 mm/año de carácter bimodal con períodos de bajo almacenamiento de agua y un caudal de 0,000295 m³/s para un total de 105 usuarios potenciales. Además, se estableció que la conexión al acueducto Asuarcopsa es la mejor alternativa de abastecimiento, para la cual se requiere un diámetro de tubería igual a una pulgada y un tanque de almacenamiento de 10.195 L, siendo posible evidenciar a través de los resultados obtenidos las deficiencias de disponibilidad, continuidad y calidad de agua presentadas por el sistema de abastecimiento actual.

Palabras clave: agua potable, abastecimiento rural, disponibilidad, continuidad, calidad, suministro de agua.

ABSTRACT

The weak infrastructure developed around drinking water supply and basic sanitation in Colombian rural areas has led to unsatisfied basic needs of their inhabitants. Therefore, this research aims at validating the basic criteria for the design of a drinking water supply system in Socotá village, municipality of Apulo, using methods such as the inverse to the distance (IDW) to determine precipitation, the Thornthwaite method to calculate evapotranspiration, the geometric methodology for population projection, and the validation of the fulfillment of criteria for the selection of the most viable supply option for its subsequent design via Hazen-Williams equations. Results allowed to identify a need of 1,101 to 1,156 mm/year of bimodal character with periods of low water storage and a regular flow of 0.000295 m³/s for a total of 105 specific users. It was also established that the aqueduct Asuarcopsa is the best supply alternative, whose connection requires a pipe diameter equal to one inch and a storage tank of 10,195L. Overall results show deficiencies of availability, continuity and quality of direct water by the current supply system, thus the importance of this study.

Keywords: Drinking water, rural supply, availability, continuity, quality, water supply.

INTRODUCCIÓN

La inadecuada gestión del recurso hídrico ha provocado que varias regiones a nivel global no tengan un eficiente acceso al agua potable, a lo cual se suma el constante crecimiento demográfico, cuya consecuencia es el aumento de la demanda de agua dulce (por lo menos el 50 % de la población mundial se abastece por medio de aguas subterráneas). Teniendo en cuenta esto, se estima que para 2030 se tendrá un déficit mundial de agua del 40 % bajo un escenario en el que todo sigue en las condiciones actuales. Aunque el acceso al agua y al saneamiento básico es reconocido como un derecho humano, dicha problemática afectará principalmente a personas de escasos recursos,

lo cual ya se evidencia en los cerca 1.200 millones de personas que habitan áreas donde el agua escasea y otros 1.100 millones que carecen de instalaciones necesarias para abastecerse de agua potable; hecho que se asocia a la presión no solo económica sino también sociopolítica y ambiental (Franeck *et al.*, 2015).

En Colombia, el recurso hídrico se ha visto afectado debido al desarrollo de actividades industriales y antropogénicas, amenazando en rangos altos y críticos de afectación a 152 subzonas hidrográficas de las 311 existentes (IDEAM, 2015). Además, el país cuenta con un escaso sistema de acueducto y alcantarillado que afecta especialmente a las zonas rurales y crea una brecha de 23 % entre estas y las zonas urbanas, según

lo estipula el Departamento Nacional de Planeación, DNP (2014).

Adicionalmente, como se muestra en el trabajo realizado por Carrasco-Mantilla (2016), la gestión del sector del agua potable y saneamiento básico en Colombia se ha visto afectada por la constante modificación de su estructura y de las organizaciones encargadas del desarrollo de las actividades encaminadas al progreso y el fortalecimiento del sector, en donde es posible evidenciar, además, que durante el desarrollo de todos estos cambios se ejecutaron políticas para garantizar la gestión equitativa de estas actividades en áreas urbanas y rurales del territorio nacional.

En este contexto, la situación a la cual se enfrenta la vereda Socotá del municipio de Apulo (Cundinamarca), permite demostrar que la equidad necesaria para garantizar el desarrollo de las áreas rurales del municipio no se está aplicando de manera óptima, puesto que, de acuerdo con datos proporcionados por la alcaldía de este municipio en su plan de desarrollo (Alcaldía Municipal de Apulo, 2016), el déficit de servicios públicos en el casco urbano es de 0,77 %, es decir, aproximadamente una de cada 100 viviendas no cuenta con servicios públicos completos, mientras que en lo rural (10,86 %) 11 de cada 100 viviendas carecen de los servicios públicos básicos. Por otra parte, en cuanto a la cobertura de acueducto y alcantarillado, el 0,38 % de las viviendas en el casco urbano carecen de esta dotación, mientras que lo mismo ocurre en el 68,4 % de las viviendas de la zona rural, para una brecha de 68 puntos.

De acuerdo con lo anterior, es importante resaltar que actualmente los habitantes de la vereda Socotá se abastecen precariamente de agua mediante la recolección de aguas lluvias, motivo por el cual en época de verano se ven limitados en el acceso al agua y optan por recorrer largas distancias (con duración hasta de dos horas) para llegar a la capital del país (Bogotá D. C.) y obtener el recurso en condiciones apropiadas para el consumo humano. Así pues, es posible establecer estas limitaciones como condiciones de vulnerabilidad para los habitantes, evidenciadas en el incumplimiento de lo establecido en primera instancia dentro los artículos 334 y 365 al 367 de la Constitución Política de Colombia, en lo concerniente al papel del Estado frente al ofrecimiento de oportunidades de acceso a los servicios básicos, los cuales se consti-

tuyen como inherentes a la función social del mismo, así como el bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población a través de la atención prioritaria de las necesidades básicas insatisfechas en materia de agua potable y saneamiento básico; además de identificar la labor que debe ejercer el municipio en la prestación de los servicios públicos domiciliarios, la cual, a su vez, es contemplada dentro de la Ley 142 de 1994 y la Ley 715 de 2001.

Debido a lo anterior, en 2017, los habitantes de la vereda interpusieron un derecho de petición ante la Alcaldía del municipio de Apulo con el fin de obtener una solución para la problemática del abastecimiento de agua potable a la que se enfrentan. Sin embargo, la respuesta obtenida manifiesta que “Los recursos del municipio se invierten para dar cumplimiento a los planes, programas y proyectos contenidos en el plan de desarrollo” y aclara que “[...] la inversión en programas sociales no se focalizan en un sector específico del municipio (vereda Socotá)...” (García-Bernal, 2017). Por otra parte, para los habitantes es un hecho indignante y de total inequidad la existencia de gran opulencia en el terreno que se encuentra al otro lado del río Bogotá, justo al frente de la vereda, donde está ubicado el club campestre “Mesa de Yeguas”, el cual cuenta con un lago artificial con capacidad para almacenar 4 millones de litros cúbicos de agua y en el que se practican diferentes modalidades de deportes náuticos.

Por lo anterior, este proyecto tiene la finalidad de realizar un análisis de viabilidad que permita identificar y diseñar los principales parámetros de un sistema de abastecimiento de agua potable para la vereda Socotá, municipio de Apulo, que cumpla con los criterios de disponibilidad, continuidad y calidad para mejorar la calidad de vida de los habitantes de esta vereda y reducir la brecha en el acceso al servicio de abastecimiento de agua potable existente entre el casco urbano y rural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El municipio de Apulo está ubicado en el departamento de Cundinamarca, limitando al norte con el municipio de Quipile y Jerusalén, al sur con el municipio de Viotá, al oriente con el municipio de Anapoima y al occidente con el municipio de Tocaima. Apulo está

conformado por 28 veredas, divididas en 4 sectores, entre las cuales se encuentra la vereda Socotá, perteneciente al sector 3, de acuerdo con el plan de desarrollo del municipio, localizada al oriente, con coordenadas geográficas $4^{\circ}30'50''N$ y $74^{\circ}33'20''W$, y colindante con el río Bogotá. Esta vereda posee un área de $6,73 \text{ km}^2$, se encuentra a una altitud entre 500 y 800 m s. n. m. (figura 1), posee un clima tropical con temperatura promedio de 27°C y una precipitación media anual de 1.130 mm. En la actualidad, se registran 98 habitantes y 44 viviendas, las cuales no cuentan con una conexión vial directa a la cabecera municipal de Apulo. El ingreso a la vereda se realiza a través de una carretera sin pavimentar en conexión con el municipio de Anapoima ubicada al nororiente de Socotá.

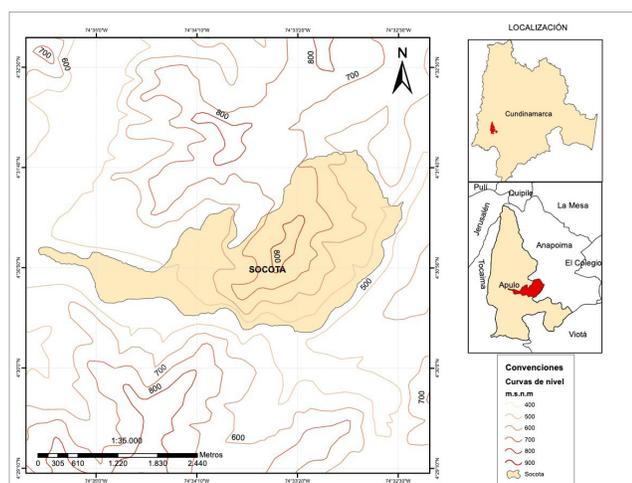


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.
Fuente: elaboración propia.

Datos

Para el desarrollo de la metodología propuesta se recolectó información a través de una base de datos creada tras una solicitud realizada al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) sobre las estaciones hidrometeorológicas cercanas a la vereda, con lo cual se logró obtener datos de precipitación y temperatura necesarios para conocer la evapotranspiración a partir de la implementación del método de Thornthwaite, de acuerdo con la metodología planteada más adelante.

Posteriormente, se recolectaron datos sobre la variación de la población de la vereda, cuyo objetivo es el cálculo de la proyección de población futura para determinar la demanda de agua. Las fuentes

de información se describen con mayor detenimiento a continuación:

- Estaciones hidrometeorológicas: se escogieron las 9 estaciones hidrometeorológicas del IDEAM más cercanas a la zona de estudio, entre las que se encuentran ESC Samper Madrid Victoria La, Col. Francisco José De Caldas, Anclaje 14, Mesitas, Darío Valencia, Mesa La, San Gregorio y Socotá.

Es importante tener en cuenta que los datos sobre precipitación y temperatura recolectados de las estaciones hidrometeorológicas corresponden a cifras mensuales y abarcan el período comprendido entre 1987 y 2014.

- Población: la obtención de esta información fue posible gracias a dos fuentes importantes. La primera de ellas es el esquema de ordenamiento territorial (EOT), en el cual se especifican los datos de los años 1985 y 1998. La segunda corresponde al departamento del Sisbén, el cual proporcionó información para el año 2018 durante las visitas realizadas a la alcaldía del municipio.

Metodología

Para el desarrollo del presente estudio se establecieron 4 fases: (i) análisis hidrológico y topográfico, (ii) estudio de la demanda de agua, (iii) alternativas de abastecimiento de agua potable y (iv) diseño de la alternativa seleccionada, en las cuales se aplicaron diversos métodos que permitieron desarrollar una investigación descriptiva y analítica con enfoque cuantitativo para la identificación de la alternativa que se adapte de forma óptima a las necesidades de la comunidad de la vereda Socotá, tomando como referencia la guía desarrollada por el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, BanObras (2010).

Análisis hidrológico y topográfico

El análisis hidrológico para la zona de estudio inicia con el establecimiento de las condiciones actuales de la vereda Socotá a través de la identificación tendencial de precipitación, donde, con los datos obtenidos de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, se realiza una interpolación por el método inverso a la distancia (IDW), que consiste en asignar el peso de forma inversamente proporcional a la distancia (a mayor distancia, menor peso) a partir del coeficiente poten-

cia β (Díaz-Padilla *et al.*, 2008), mediante el uso del software de sistemas de información geográfica ArcGIS.

Posteriormente, se evalúa la evapotranspiración a través de la aplicación del método de Thornthwaite, tomando como base metodológica lo propuesto por Bustamante *et al.* (2013), cuya aplicación permite el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual de una superficie de referencia cubierta de césped con base en la temperatura media mensual, con el fin de estimar la necesidad de agua del lugar (Marín, 2010). Adicionalmente, se requiere un factor de ajuste que relaciona la altitud de la zona de estudio ($4^{\circ}30'50''N$) y la insolación teórica; este factor se puede encontrar la obra de Quereda (2005).

La evapotranspiración potencial se expresa como:

$$ETP = 16(10T/I)^a \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

ETP: evapotranspiración potencial mensual no corregida (mm/mes)

T: temperatura media mensual en $^{\circ}C$

I: índice de calor anual siendo:

$$I = \sum(T/5)^{1.514} \quad (\text{Ec. 2})$$

a: exponente empírico en función de I, donde:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49239 \quad (\text{Ec. 3})$$

Para obtener la evapotranspiración potencial ajustada, se divide la ETP con el factor de ajuste según el mes; este factor tiene en cuenta la latitud y el número de horas de insolación teórica (Montaner, 1988)

$$ETP_a = ETP / \text{factor de ajuste} \quad (\text{Ec. 4})$$

A continuación, se debe calcular la precipitación útil para cada mes (Δ). Este cálculo ayuda a obtener la capacidad de almacenamiento, el déficit y el exceso de agua que presenta cada mes:

$$\Delta = P - ETP_a \quad (\text{Ec. 5})$$

Para finalizar, se calcula la evapotranspiración real (ETR) evaluando los siguientes criterios:

$$\text{Si } P \geq ETP_a \text{ entonces } ETR = ETP_a \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Si } P < ETP_a \text{ entonces } ETR = P + (P - ETP_a)$$

Donde:

P: precipitación (mm/mes)

ETR: evapotranspiración real (mm/mes)

ETP_a: evapotranspiración potencial mensual ajustada (mm/mes)

Para el análisis topográfico se determina el perímetro y área de la vereda por medio del Software ArcGIS, según la metodología utilizada por Aliaga (2006), en la cual se realiza una superposición de imágenes y digitalización de la zona de estudio. La pendiente se calcula según el método tradicional topográfico, donde se relaciona el desnivel y la distancia horizontal del terreno, dada por la expresión:

$$Dv/Dh * 100 = \text{Pendiente } \% \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

Dv: distancia vertical del terreno

Dh: distancia horizontal del terreno

Demanda de agua

Esta fase pretende calcular los valores mínimos que requiere un habitante de la vereda Socotá para satisfacer sus necesidades. Para esto se tuvo en cuenta lo establecido en la Resolución 0330 de 2017 que adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua potable y Saneamiento Básico (RAS), según lo descrito por López (2003).

A través del método geométrico se calcula la proyección de la población teniendo en cuenta los datos proporcionados por el Sisbén y el EOT de Apulo, junto con el porcentaje de crecimiento del departamento de Cundinamarca (2%), a partir de la expresión:

$$P_f = P_{uc}(1 + r)^{Tf-Tuc} \quad (\text{Ec. 8})$$

La tasa de crecimiento anual se obtiene a través de:

$$r = (P_{uc}/P_{ci})^{(1/(T_{uc}-T_{ci}))} - 1 \quad (\text{Ec.9})$$

Donde:

r: tasa de crecimiento anual en forma decimal

P_f : población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes)

P_{uc} : población correspondiente a la proyección del último año (habitantes)

P_{ci} : población correspondiente al censo inicial con información (habitantes)

T_{uc} : año correspondiente al último año proyectado del último año

T_f : año al cual se quiere proyectar la información

La determinación de la dotación neta, correspondiente a la cantidad mínima de agua requerida por habitante, se estableció según la altura promedio al nivel del mar. Por su parte, la dotación bruta se obtiene a partir de la relación de la dotación neta y las pérdidas técnicas, expresada como:

$$D_{Bruta} = (d_{neta} / (1 - \%p)) \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

D_{Bruta} : dotación bruta (L/hab*día)

d_{neta} : dotación neta (L/hab*día)

$\%p$: porcentaje de pérdidas técnicas máximas para diseño (no debe superar 25 %)

Finalmente, para obtener la demanda de agua de la población proyectada a 25 años se calculan los caudales requeridos de la siguiente forma.

El caudal medio diario (Qmd) en L/s, se expresa como:

$$Qmd = (p * D_{Bruta}) / 86400 \quad (\text{Ec. 11})$$

Para un sistema nuevo, el caudal máximo diario (QMD) en L/s se expresa como:

$$QMD = Qmd * 1.30 \quad (\text{Ec. 12})$$

El caudal máximo horario (QMH) en L/s, para sistemas nuevos se expresa como:

$$QMH = QMD * 1.6 \quad (\text{Ec. 13})$$

Viabilidad de abastecimiento de agua

Para el análisis de viabilidad se seleccionaron tres posibles fuentes de abastecimiento de agua potable para la vereda Socotá: acueductos municipales, acueductos veredales y aguas subterráneas, teniendo en cuenta el desarrollo metodológico de Angarita-Zambrano (2016).

Es importante aclarar que para la selección de las alternativas aquí dispuestas se tuvieron en cuenta las siguientes atribuciones:

1. Acueducto Empoapulo S.A. E.S.P, municipio de Apulo: dada la ubicación geográfica de la vereda y su correspondencia administrativa con el municipio de Apulo, es responsabilidad directa del mismo prestar los servicios públicos domiciliarios a todos sus habitantes, de acuerdo con lo establecido dentro de la Ley 142 de 1994 y la Ley 715 de 2001, razón por la cual se establece como alternativa de abastecimiento.
2. Acueducto Aguas del Tequendama S.A. E.S.P, municipio de Anapoima: teniendo en cuenta la conectividad inmediata que posee la vereda Socotá con el municipio de Anapoima, y de acuerdo con la información suministrada por los habitantes de la vereda en relación con la ejecución de actividades diarias como el trabajo, la compra de los alimentos, la educación y la atención médica en este municipio.
3. Acueducto Asuarcopsa (Asociación de Usuarios del Acueducto Regional de Anapoima), municipio de Anapoima, para el cual se tuvieron en cuenta los siguientes factores:
 - La petición realizada por la comunidad tras acercamientos de los representantes de la junta de acción comunal (JAC) de la vereda Socotá con los encargados del acueducto, producto de las observaciones positivas realizadas por los usuarios acerca de la calidad del servicio prestado por el acueducto a veredas vecinas.
 - El conocimiento del acueducto por parte del ingeniero Jesús Ernesto Torres, quien participó y asesoró el desarrollo del proyecto "Diagnóstico y optimización del sistema de acueducto veredal Asuarcopsa de Anapoima entre la bocatoma y la planta de tratamiento".

- El reporte de prestador de servicio obtenido del Sistema de Información de Agua Potable y Saneamiento Básico (SIASAR), al cual pertenece Colombia y que tiene como objetivo desarrollar la capacidad del personal técnico en cada país para planificar, monitorear y gestionar el sector del agua y el saneamiento rural de forma efectiva, siendo diseñado como un modelo conceptual de análisis y monitoreo de información en este sector, estandarizando lo regionalizado y lo público. En este reporte se especifica que el acueducto Asuarcopsa cuenta con el volumen suficiente para cubrir la demanda requerida, además de contar con la estructura necesaria y encontrarse en las condiciones apropiadas para la producción de agua potable (SIASAR, s.f)
4. Finalmente, se tiene en cuenta la alternativa de abastecimiento por medio de aguas subterráneas, atendiendo la petición de los habitantes de la vereda, debido a que a partir del desarrollo de un estudio tradicional realizado por la comunidad se obtuvo información sobre la posible existencia de agua a una profundidad en un rango de 6 a 15 metros, con posterior desarrollo de excavaciones y verificación de la existencia de aguas subterráneas.

De acuerdo con lo anterior se prevé un estudio de la caracterización de la calidad del agua según los criterios establecidos en la Resolución 2115 de 2007, en el cual se tomará una muestra de 1.000 ml del agua de la excavación y se procederá a evaluar el pH *in situ* por medio de cinta indicadora. Posteriormente, de manera *ex situ*, el pH se evaluará con un pH metro con precisión de 0,01 unidades de pH y la conductividad de forma directa con un conductímetro; ambos equipos se calibrarán con soluciones amortiguadoras de 4,00 y 7,00 unidades de pH. Las características químicas restantes se evaluarán por medio de espectrofotometría ultravioleta en laboratorio, de conformidad con la metodología propuesta por Pérez-Moreno *et al.* (2003).

En consecuencia, para determinar la viabilidad del suministro por parte de los acueductos, se realiza la revisión de los requisitos establecidos por los mismos para la evaluación de la disponibilidad de agua con el fin de obtener información de la red de distribución y el análisis del suministro.

Para evaluar la alternativa del agua subterránea se recolecta información sobre los pozos registrados en la base de datos disponible de la Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca y la investigación sobre la presencia de acuíferos a fin de identificar su existencia dentro o en zonas aledañas a la vereda.

A partir de la información recolectada se realiza un análisis de viabilidad en el que se tiene en cuenta los siguientes criterios: (i) disponibilidad, (ii) calidad, (iii) continuidad y (iv) distancia desde la fuente abastecedora hasta la vereda Socotá, partiendo del concepto de seguridad hídrica expuesto por Peña (2016, p. 7), que “Consiste en tener: una disponibilidad de agua que sea adecuada, en cantidad y calidad, para el abastecimiento humano, los usos de subsistencia, la protección de los ecosistemas y la producción”, y por Martínez-Austria (2013, p. 165), quien afirma que la seguridad hídrica es “[...] aquella que garantiza agua suficiente en calidad y cantidad para los diversos usos, a precios asequibles y en equidad”. Así mismo, se tuvo en cuenta lo dispuesto en el artículo 11 de la Ley 142 de 1994 sobre la función social de la propiedad en las entidades prestadoras de servicios públicos. A partir de lo anterior, se determina el cumplimiento o incumplimiento de los criterios a través de una matriz de validación con el objetivo de identificar la alternativa de abastecimiento que permita satisfacer la necesidad de agua potable y así mejorar la calidad de vida de los habitantes de la vereda.

Diseño de la alternativa

Se identifica la necesidad de verificar la información obtenida en el trabajo de campo para realizar el perfil topográfico a través de los software Google Earth y AutoCAD, con los cuales se busca determinar longitudes y desniveles del terreno y tipo de sistema de conducción requerido, junto con sus respectivos accesorios, para el posterior cálculo del diámetro de la tubería según la ecuación de Hazen-Williams (López, 2003), la cual se expresa como:

$$D = \left[\frac{Q}{0.2785 * C * S^{0.54}} \right]^{1/2.63} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

D: diámetro (m)

Q: caudal (m³/s)

C: coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

R: radio hidráulico = A_{mojada}/P_{mojado} (m)

S: pendiente del terreno = $h_{disponible}/longitud\ tubería$

Adicionalmente, se determina el volumen del tanque requerido para el almacenamiento de agua en la vereda Socotá, como se muestra en la siguiente expresión:

$$V=1.2*V_{CMH}*Q \quad (Ec.15)$$

Donde:

V: volumen del tanque (m³)

V_{CMH} : volumen del consumo máximo horario

Q: caudal (m³/día)

De acuerdo con lo establecido en el RAS, para el valor de V_{CMH} se utiliza el porcentaje empírico para poblaciones pequeñas, el cual corresponde a 1/3.

RESULTADOS

A continuación, se reportan los resultados obtenidos de acuerdo con la estructura de la metodología planteada anteriormente.

Análisis hidrológico y topográfico

Precipitación

De acuerdo con la metodología establecida para el cálculo de la precipitación anual y el análisis realizado en 2018, se evidenció que Socotá posee una precipitación entre 1.101 y 1.156 mm/año, como se observa en la figura 2.

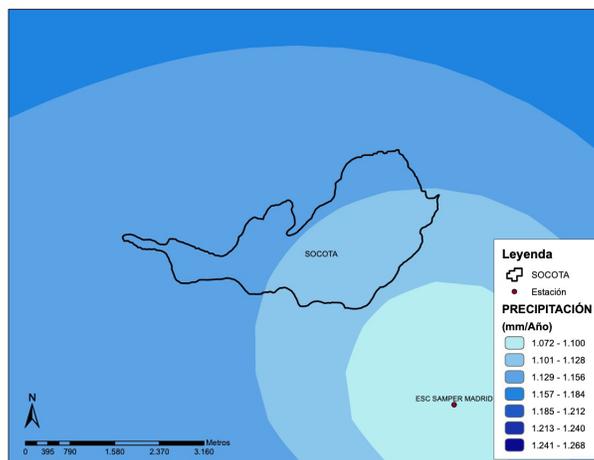


Figura 2. Interpolación por IDW para precipitación anual (2018). Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la estación más cercana a la vereda (ESC Samper Madrid), la precipitación a lo largo del año muestra un comportamiento bimodal que exhibe un máximo de precipitación en marzo, abril, octubre y noviembre y un mínimo en julio y agosto, donde la precipitación no sobrepasa 40 mm (figura 3).

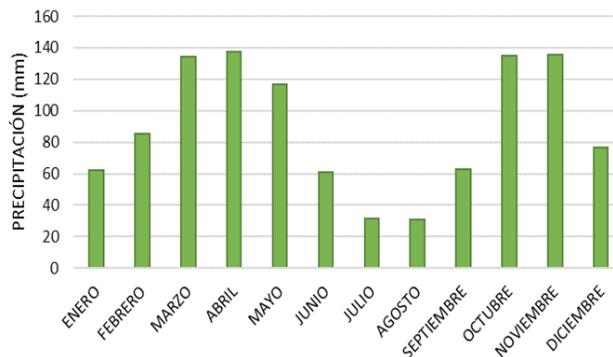


Figura 3. Comportamiento anual de la precipitación. Fuente: elaboración propia.

Evapotranspiración real

Consecuentemente, por medio de la aplicación del método de Thornthwaite se realizó el balance hídrico (tabla 1), evidenciando que la vereda posee un déficit de agua en los meses de febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre; períodos secos que se establecen como críticos debido a las dificultades de acceso al recurso hídrico y que afectan el abastecimiento por medio de agua lluvia. Además, fue posible evidenciar que solo en el mes de abril existe un delta de almacenamiento, llegando a 800 mm, y que octubre exhibe un almacenamiento moderado.

Tabla 1. Balance Hídrico Estación Parcial

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación (Pm)	107,10	60,80	107,30	398,30	69,70	18,20	36,80	51,10	53,00	256,50	112,70	59,20	1.330,70
ETP	105,30	96,44	136,23	142,02	172,87	188,66	199,81	210,37	199,87	153,82	148,59	167,27	1.921,25
Factor de ajuste	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02	
ETPa	103,24	103,70	132,26	139,24	163,09	183,16	188,50	200,36	197,90	149,34	150,09	163,99	1.874,84
Δ	3,86	-42,90	-24,96	259,06	-93,39	-164,96	-151,70	-149,26	-144,90	107,17	-37,39	-104,79	-
Variación (Alm)	3,86	0,00	0,00	100,00	6,61	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	62,61	0,00	-
Deficit	0,00	-39,00	-63,96	0,00	0,00	-158,35	-151,70	-149,26	-144,90	0,00	0,00	-42,18	-749,34
Exceso	0,00	0,00	0,00	159,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,17	0,00	0,00	166,23
Δ Alm	3,90	-3,90	0,00	100,00	-93,39	-6,61	0,00	0,00	0,00	100,00	-37,39	-62,61	-
ETR (mm)	103,24	64,70	132,26	139,24	163,09	24,81	36,80	51,10	53,00	149,34	150,09	121,81	1.189,43

Fuente: elaboración propia.

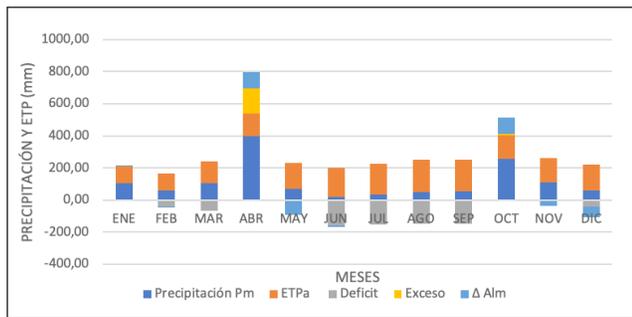


Figura 4. Representación gráfica del balance hídrico estación parcial.
Fuente: elaboración propia.

Área y perímetro

Por medio de la digitalización de la vereda en el software ArcGIS se obtiene como resultado un área de 7,1 Km² y un perímetro de 16,2 Km, evidenciando que la vereda ocupa 5,8 % del territorio total del municipio de Apulo (12.240 ha).

Pendiente

A partir de los cálculos realizados, la vereda posee por el costado oriental una pendiente de 38,63 %, mientras que por el costado occidental es de 21,59 %, por lo cual es posible determinar, según lo establecido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2014), que el territorio de la vereda cuenta con una pendiente fuertemente ondulada y moderadamente quebrada.

Demanda de agua

A partir de la investigación realizada en las diferentes entidades mencionadas se obtuvieron los datos relacionados en la figura 5, donde se evidencia un amplio decrecimiento de la población de la vereda.

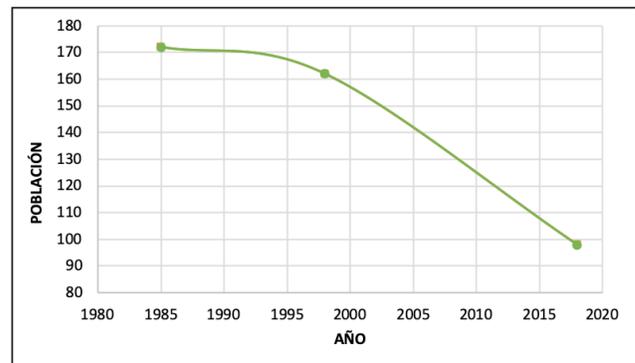


Figura 5. Evolución poblacional 1985-2018.
Fuente: elaboración propia.

Con la información recolectada se realizó la proyección poblacional para los años 2030 y 2043 (figura 6), lo cual permitió determinar las dotaciones y caudales requeridos. Con esta información fue posible realizar el diseño de la tubería necesaria, como se detalla en la tabla 2.

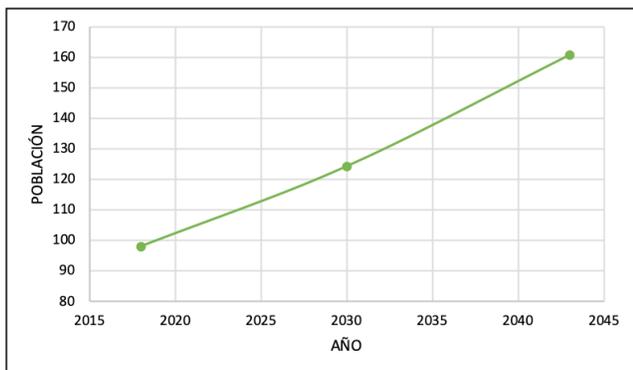


Figura 6. Proyección poblacional total
Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Determinación de caudales

Dotación neta (L/hab*día)	140
Dotación bruta (L/hab*día)	186,67
Qmd (L/s)	0,347
QMD (L/s)	0,452
QMH (L/s)	0,723

Fuente: elaboración propia.

Usuarios

Por medio del trabajo realizado en campo fue posible identificar que, debido a deficiencias en la organización y administración de la vereda, actualmente cerca de 16 predios han solicitado el suministro de agua potable, por lo que es necesario recalculer la proyección (tabla 3) y el caudal requerido para el abastecimiento de los usuarios potenciales (tabla 4).

Tabla 3. Usuarios potenciales

Año	Población
2018	64
2030	81
2043	105

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Caudal para usuarios potenciales

Dotación neta (L/hab*día)	140
Dotación bruta (L/hab*día)	186,67
Qmd (L/s)	0,227
QMD (L/s)	0,295
QMH (L/s)	0,472

Fuente: elaboración propia.

Viabilidad de abastecimiento

Acueductos municipales

A través de la información obtenida del acueducto Aguas Tequendama S.A. E.S.P, se evidencia la necesidad de incurrir en gastos por parte de los habitantes de la vereda para posibilitar el estudio de abastecimiento de agua potable. Por esta razón, se tiene en cuenta la información obtenida mediante investigación bibliográfica y lo reportado en el trabajo de Botero-Monsalve *et al.*, (2017, p. 16), quienes afirman que:

En total, el municipio tiene la capacidad de recibir 38 l/s, pero en la conducción desde Tena hasta Anapoima, el sistema pierde 15 l/s debido a conexiones fraudulentas realizadas en el área rural. De esta forma no es posible garantizar suministro continuo para el municipio.

A lo anterior, se suma lo descrito en la evaluación integral de prestadores de la Empresa Regional de Aguas del Tequendama S.A. E.S.P (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019), en donde se promulga que “[...] la continuidad para los años 2017 y 2018 presuntamente no cumplió con lo dispuesto en el anexo técnico de los Contratos de Condiciones Uniformes. Adicionalmente, la continuidad clasificó como insuficiente de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007”. Esto permite identificar la falta de disponibilidad de agua por parte de este acueducto para el abastecimiento de la vereda Socotá; además de que este se encuentra a una distancia de 2,31 km del lugar en el que se proyecta la ubicación del tanque enuncia-do en el punto 10 de la tabla 7.

Por otro lado, de acuerdo con la respuesta al derecho de petición enviado por los habitantes de la vereda a la alcaldía de Apulo, se evidencia que la alcaldía (ente

administrativo coordinador de la gestión de Empoapulo) no posee los recursos financieros necesarios para la ampliación del acueducto Empoapulo S.A. E.S.P, requerida para el abastecimiento de agua potable, puesto que este rubro no se contempló en el plan de desarrollo. Adicionalmente, la distancia existente entre este acueducto y la ubicación de la proyección del tanque de almacenamiento y distribución es de 4,75 km.

Acueducto veredal

En conformidad con los datos registrados en la tabla 7, la distancia existente entre el tanque proyectado para la vereda Socotá (punto 10) y el último punto de la red de distribución del acueducto veredal Asuar-copsa (punto 4), ubicado en el municipio de Anapoima, es de 0,95 km. Además, tras acercamientos entre la JAC de Socotá y los administradores del acueducto, se identifica la disponibilidad de agua para de suministro del servicio a la vereda.

Aguas subterráneas

Se evidenció que no existen pozos registrados en la vereda Socotá o en zonas aledañas a esta. Sin embargo, se identificó la existencia del acuífero Purificación-Saldaña.

De acuerdo con lo anterior, y de conformidad con la información obtenida por medio de la comunidad, se realiza la caracterización de la calidad del agua presente en la zona, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 5, donde el color rojo representa las concentraciones de los contaminantes por encima de las permitidas y el naranja representa las concentraciones de contaminantes próximas a sobrepasar los límites establecidos en la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Es importante tener en cuenta que la muestra de agua fue obtenida en la excavación realizada por los habitantes de la vereda, la cual cuenta con un área de 2,5 m² y un nivel freático a 5 metros de profundidad, aproximadamente, que se localiza en las coordenadas 4°30'57.8"N 74°32'52.7"W. Adicionalmente, esta no posee protección frente a la caída de materia orgánica (hojas, ramas, etc.), ni refuerzo de las paredes que evite el derrumbe de las mismas o el desprendimiento de suelo, razón por la cual se tuvo la precaución de tomar la muestra a una profundidad de 1 metro bajo la superficie del agua.

Tabla 5. Caracterización del agua subterránea en la vereda Socotá

Muestra de agua subterránea			
Parámetro	Rango de aceptación		Valor
Sabor	Aceptable		-
Olor	Aceptable		Aceptable
Temperatura	°C		16,1
pH <i>in situ</i>	6,5-9,0		8
pH <i>ex situ</i>	7,29		
Color	< 15	UPC	15
Turbiedad	< 2	UNT	26,5
Conductividad	< 1.000	µS/cm	2.977
Dureza	< 300	mg/L	347,6
Alcalinidad	< 200	mg/L	332,2
Sulfatos	< 250	mg/L	>265
Cloruros	< 250	mg/L	8,37
Nitritos	< 0,1	mg/L	0,11
Nitratos	< 10	mg/L	3,3
Calcio	< 60	mg/L	>160
Zinc	< 3	mg/L	0,15
Fosfatos	< 0,5	mg/L	0,4
Hierro	< 0,3	mg/L	0,123
Manganeso	< 0,1	mg/L	0,98
Aluminio	< 0,2	mg/L	< 0,020

Fuente: elaboración propia con datos de la Resolución 2115 de 2007.

Validación de criterios

Teniendo en cuenta la información recolectada sobre las alternativas de abastecimiento seleccionadas para el suministro de agua potable a la vereda Socotá, se evalúa el cumplimiento de los criterios establecidos en la metodología para el desarrollo del análisis de viabilidad. De acuerdo con lo anterior, se desarrolla la validación presentada en la tabla 6.

Según lo expresado en la tabla 6, se selecciona como la alternativa más viable para el abastecimiento de agua potable el acueducto veredal Asuarcopsa, teniendo en cuenta que cumple con todos los criterios establecidos y que se encuentra a una distancia considerablemente corta hasta el punto en el que se proyectó el tanque en la vereda Socotá.

Tabla 6. Validación de cumplimiento de criterios

Criterios de viabilidad	Alternativas de abastecimiento							
	Acueductos municipales				Acueducto veredal Asuarcopsa		Aguas subterráneas	
	Empopulo S.A. E.S.P.		Aguas del Tequendama S.A. E.S.P.		Cumple	No cumple	Cumple	No cumple
	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple				
Disponibilidad		X		X		X		X
Calidad	X		X		X			X
Continuidad		X		X	X			X
Distancia (Alternativa - Proyección de tanque)		4,75 km		2,31 km		0,95 km		0,79 km

Fuente: elaboración propia.

Diseño

El acueducto Asuarcopsa “...cuenta con 570 suscriptores, con un promedio de 5 personas por punto de agua para una población de 2850 personas...” (Huér-fano-Maciado & Segura-Garzón, 2019, p. 34), que se encuentran distribuidos en las veredas Plenitud, Santa Ana, Providencia Mayor, Providencia García, El Cabral,

El Consuelo Alto, El Consuelo Bajo y Santa Rosa, municipio de Anapoima, esta última con una conexión con la vereda Socotá.

Para el diseño de la alternativa de abastecimiento fue necesario recolectar las coordenadas de los puntos estratégicos que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Ubicación de los principales puntos para el diseño.

Punto	Descripción	Coordenada X	Coordenada Y
1	Vía principal de Anapoima	74°32'5.58"O	4°32'59.68"N
2	Entrada a las veredas	74°32'22.77"O	4°32'28.78"N
3	Vía Asuarcopsa	74°32'16.97"O	4°32'5.87"N
4	Fin de tubería 2 pulgadas	74°32'24.05"O	4°31'39.89"N
5	Entrada predio Sr Macedonio	74°32'31.09"O	4°31'27.70"N
6	Medidor del predio	74°32'31.78"O	4°31'27.72"N
7	Tanque del predio	74°32'32.39"O	4°31'27.47"N
8	Paso alto tubería	74°32'33.22"O	4°31'27.07"N
9	Predio Señor Carlos Torres	74°32'43.87"O	4°31'25.56"N
10	Proyección de tanque	74°32'50.05"O	4°31'23.10"N

Fuente: elaboración propia.

De conformidad con los datos obtenidos, se procede a hacer el trazado del perfil topográfico a través de la implementación del software AUTOCAD (figura 7), mediante el cual fue posible obtener la longitud de la tu-

bería requerida y sus respectivos accesorios, atendiendo a las diferencias de nivel entre los puntos 8 y 10 de la tabla 7, a partir de la cual fue posible identificar que el tipo de conducción factible es por gravedad.

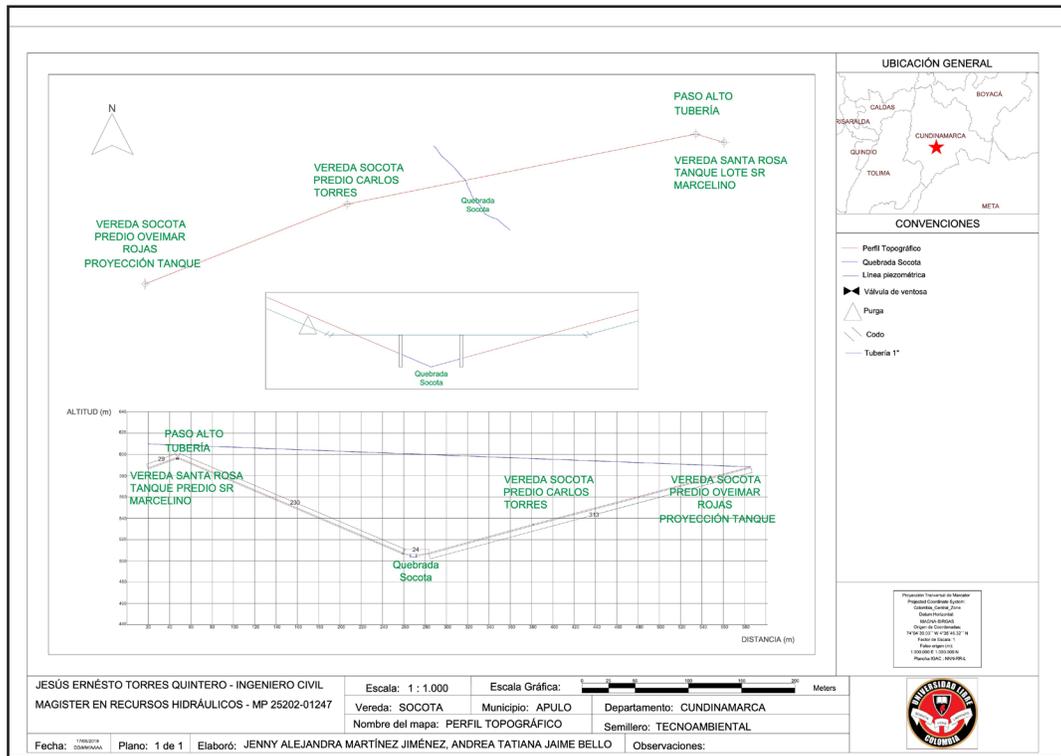


Figura 7. Perfil topográfico
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, a partir del perfil topográfico obtenido se realizaron los cálculos para el diámetro de la tubería:

$$\phi = \left(\frac{0.000295}{0,2785 * 150 * \left(\frac{600.528 - 582.451}{723.95} \right)^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2,63}}$$

$$\phi = 0.02347m$$

$$V = 1.2 * \frac{1}{3} * 25,488m^3/día$$

$$V = 10,195 m^3 = 10,195 L$$

Por lo tanto, se requiere una tubería en PVC con diámetro de 1 pulgada para transportar el agua hasta el tanque proyectado en la vereda Socotá, con un caudal de 0.000295 m³/s.

De otro lado, teniendo en cuenta que no se dispone de la curva de consumo horario de la población, para determinar el volumen de consumo máximo horario (VCMH) se utiliza el porcentaje empírico establecido por el RAS para poblaciones pequeñas (1/3) en el cálculo del tanque necesario para el almacenamiento del agua de la vereda.

De acuerdo con lo anterior, el volumen del tanque necesario para el almacenamiento del agua es de 10,195 L.

Presupuesto

Con los resultados anteriores se determinaron los precios correspondientes para el diseño realizado, los cuales se obtuvieron a partir de lo establecido por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2019) en el componente económico, conforme al análisis de precios unitarios (APU), como se aprecia en la tabla 8.

Tabla 8. Presupuesto para el desarrollo de la alternativa de abastecimiento de agua potable (pesos colombianos)

Inversión				
Ítems	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Excavación manual	m3	231,68	\$ 26.499	\$ 6.139.288
Tubería PVC D=1" RDE 21	m	724,00	\$ 12.183	\$ 8.820.492
Válvula Ventosa 1"	Unidad	1,00	\$ 392.568	\$ 392.568
Estructura metálica paso tubería	Unidad	1,00	\$ 7.000.000	\$ 7.000.000
Válvula purga 1"	Unidad	1,00	\$ 299.800	\$ 299.800
Válvula compuerta	Unidad	2,00	\$ 262.224	\$ 524.448
Tanque 10,000 L	Unidad	1,00	\$ 5.600.000	\$ 5.600.000
			Subtotal	\$ 28.776.596
			AIU 19 %	\$ 5.467.553
			Total	\$ 34.244.150

Fuente: elaboración propia con datos del IDU (2019).

Entre los datos del IDU no existe un tanque con capacidad aproximada de 10,195 L. Sin embargo, un valor aproximado para un tanque con las proporciones necesarias que requiere la vereda es de COP 5,712,000, este valor es la sumatoria de un tanque de 10,000 L (COP 5,600,000) y un tanque de 200 L (COP 112,000).

DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta las condiciones en las que se encontraba la excavación realizada por los habitantes de la vereda, y de conformidad con los resultados de la caracterización del agua subterránea obtenidos, se evidencia que el valor de turbidez no es propia de este tipo de agua, según lo descrito por Custodio (1996, p. 26): “La pequeñez de los canalículos por los que circula el agua hace que el transporte de masa se reduzca a las sustancias disueltas y ciertos coloides, y así el agua carece de turbidez”. Adicionalmente, este elevado valor puede ser relacionado con lo descrito por Carrasco (1988, p. 82):

La turbidez del agua puede deberse a varias causas: partículas finas de origen mineral, detritus constituidos por material inorgánico u orgánico y microorganismo. Las partículas orgánicas llevan una importante flora bacteriana y micótica en su superficie empleando la partícula como sustrato nutritivo. También las partículas minerales adsorben nutrientes en su superficie, encontrando allí los microorganismos un medio adecuado para su vida. Puede constatarse que cuando un aumento de turbidez lleva parejo un aumento del número de bacterias se debe a materia orgánica en suspensión, si el aumento de turbidez no influye o lo hace de forma escasa sobre el número de bacterias se debe a materia inorgánica.

Sin embargo, se evidencia la existencia de investigaciones en las que se obtienen resultados similares, como la desarrollada por Gómez (2009), en la que se obtiene un valor de turbidez de 24,8 UNT en el aljibe número A25 La Mareiba, con profundidad aproximada de 6 metros bajo tierra.

En el estudio hidrológico realizado para evaluar las condiciones actuales de la vereda se puede observar que la mayor parte del año cuentan con un déficit de aguas lluvias por bajas precipitaciones. Además, aun cuando es posible establecer dos períodos de precipitaciones que permiten el almacenamiento de agua, se evidencia que se superan los límites de escasez de agua debido a que las precipitaciones de estos períodos no son suficientes para lograr su equilibrio con los valores de evapotranspiración, como especifican Hernández *et al.* (2014) en un estudio realizado para la zona de los valles interandinos del Tolima, en el cual se manifiesta un comportamiento similar a la vereda Socotá y se expone la importancia de futuros trabajos donde se garantice la disponibilidad de agua.

Los criterios de calidad y continuidad validados para la determinación de la alternativa de abastecimiento de agua potable adecuada para la vereda Socotá se relacionan como criterios clave en la investigación de Lopez-Mandavera (2015), donde son incluidos para la determinación de factores como fiabilidad y responsabilidad, lo cual posibilita la identificación de estos factores como fundamentales en la evaluación de la satisfacción de las necesidades de los usuarios actuales o potenciales del servicio. Esto se refleja también en el análisis realizado por Basallo-Barbosa *et al.* (2015), en el que se permite la aplicación de la norma ISO 9001 para la valoración de la satisfacción de los usuarios a partir de los criterios previamente mencionados, además de ser asociado de forma paralela a las encuestas realizadas por entidades como las Empresas Públicas del Quindío (2016) y en la evaluación de prestadores realizada por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2019).

El desarrollo inclusivo de zonas rurales como la vereda Socotá es un factor que ha venido siendo tratado por el Gobierno de Colombia y que se encuentra contemplado dentro de los ámbitos fundamentales para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, la cual afirma que “La atención que actualmente se está prestando al desarrollo urbano debe compensarse con un mayor interés en el papel que representan las características y las redes territoriales en un enfoque holístico del desarrollo rural” (OCDE, 2015, p. 17). Sobre el tema, además de la importancia de disminuir las brechas existentes entre las áreas rurales y urbanas del país en temas como el ac-

ceso a servicios públicos de calidad, el Banco de Desarrollo de América Latina (2018, p. 1) sostiene que:

[...] acortar las brechas de acceso al agua y saneamiento entre las zonas urbanas y rurales se ha convertido en una de las grandes tareas pendientes de la región, lo cual demanda, con sentido de urgencia, un mayor compromiso por parte de los gobiernos y organismos de cooperación para revertir esta situación de desigualdad.

A partir de esta información, es posible evidenciar la trascendencia del desarrollo de proyectos que incentiven el avance del área rural.

CONCLUSIONES

Se atiende a la posibilidad de que los altos valores de turbidez obtenidos en la presente investigación sean producto de la contaminación de la muestra debido a la exposición del agua a la caída de material orgánico y a la falta de información sobre las características del acuífero, siendo importante la adquisición de datos sobre atribuciones como el tipo de recarga y las formaciones rocas cercanas al mismo para el desarrollo de estudios posteriores sobre esta alternativa.

El sistema de abastecimiento de agua actualmente empleado en la vereda para la recolección de aguas lluvias no es suficiente para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes en relación con el análisis de la precipitación y la evapotranspiración realizados, por lo tanto, es de vital importancia la implementación de un sistema de abastecimiento que cumpla con las características fundamentales para el consumo humano.

De conformidad con los criterios de viabilidad establecidos para la validación de la mejor alternativa de suministro de agua potable para la vereda Socotá, quedan abiertos canales investigativos asociados a la mejora del sistema de abastecimiento planteado, así como futuras evaluaciones de la efectividad de la alternativa diseñada, teniendo en cuenta que la presente investigación estableció los criterios técnicos base para la ejecución y construcción de la conexión con el acueducto Asuarcopsa.

La investigación realizada pretende incentivar el desarrollo de proyectos eficientes que permitan reducir las brechas existentes entre las zonas rurales y urbanas del país en relación con el acceso a los servicios

públicos domiciliarios, contribuyendo de esta manera a un avance social y de infraestructura equitativo que permita satisfacer las necesidades de las poblaciones vulnerables.

REFERENCIAS

- Alcaldía Municipal de Apulo (2016). *Plan de Desarrollo: Territorio de oportunidades para la inversión, el progreso y el desarrollo social*. Alcaldía Municipal de Apulo.
- Aliaga, G. (2006). Juan Peña Llopis. Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio. *Revista de geografía Norte Grande*, 36, 97-101. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022006000200007>
- Angarita-Zambrano, G. (2016). *Estudio de viabilidad para la construcción del acueducto del puesto fluvial avanzado de infantería de marina No. 63 ubicado en El Encanto, Amazonas* [tesis de maestría, Universidad de Manizales, Colombia]. Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2018). La brecha urbano-rural, una tarea pendiente en América Latina. *Visiones*. <https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2018/11/la-brecha-urbano-rural-una-tarea-pendiente-en-america-latina/>
- Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C. [BanObras]. (2010). *Guía para el desarrollo de estudios de viabilidad para proyectos del PROMAGUA: Proyectos de Agua Potable*. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.
- Basallo-Barbosa, L. B., Mosquera-Cerquera, G. A., & Leal-Céspedes, J. C. (2015). La comunicación y satisfacción del cliente externo desde el sistema de gestión de calidad en la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio, E.S.P. *Revista electrónica de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad de Los Llanos*, 2(1), 19-22. <https://doi.org/10.22579/23463910.119>
- Botero-Monsalve, J. P., González-Reyes, G. P., & Sánchez Ruíz, C. A. (2017). *Diagnóstico del estado actual de redes y evaluación técnico-económica de las alternativas para la optimización del sistema de acueducto del municipio de Anapoima* [trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Universidad Católica de Colombia.
- Bustamante, A., Pérez, A., Espitia, J., & Cárdenas, E. (2013). Análisis de datos meteorológicos para identificar y definir el clima en Yopal, Casanare. *Revista Medicina Veterinaria*, 25, 85-92. <https://doi.org/10.19052/mv.2301>
- Carrasco, A. (1988). Hidrogeología del campo de Nija y Acuíferos "marginales" (Almería). En *Tecnología de la intrusión en Acuíferos Costeros, TIAC*. [HTTPS://AGUAS.IGME.ES/IGME/PUBLICA/TIAC.HTM](https://AGUAS.IGME.ES/IGME/PUBLICA/TIAC.HTM)
- Carrasco-Mantilla, W. (2016). Estado del arte del agua y saneamiento rural en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 44, 46-53. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i44.923>
- Congreso de la República de Colombia. (1994, julio 11). *Ley 142 de 1994. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. *Servicios Públicos Domiciliarios*. Diario Oficial n.º 41.433.
- Congreso de la República de Colombia. (2001, diciembre 21). *Ley 715 de 2001. Por la cual se dictan normas orgánicas en materia de recursos y competencias de conformidad con los artículos 151, 288, 356 y 357 (Acto Legislativo 01 de 2001) de la Constitución Política y se dictan otras disposiciones para organizar la prestación de los servicios de educación y salud, entre otros*. Diario Oficial n.º 44.654.
- Custodio, E. (1996). Explotación racional de las aguas subterráneas. *Acta Geológica Hispánica*, 30(1-3), 21-48.
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2014). *CONPES 3810*. DNP.
- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Quiroz, R., Garatuza-Payan, J., Watts-Thorp, C., & Cruz-Medina, I. R. (2008). Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona Barlovento y Sotavento del Golfo de México. *Agricultura Técnica en México*, 34(3), 279-287.

- Empresas Públicas del Quindío. (2016). *Encuesta de satisfacción del cliente usuario del servicio de acueducto, alcantarillado y gas*. Empresas Públicas del Quindío.
- Franek, A., Koncagul, E., Connor, E., & Hunziker, D. (2015). *Agua para un mundo sostenible*. UNESCO.
- García-Bernal, G. (2017). *Respuesta Derecho de petición Virginia Torres y Otros. Número de Radicado 2685*. Alcaldía Municipal de Apulo.
- Gómez, J. (2009). *Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico caso de aplicación: acuífero costero del municipio de Turbo* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional de Colombia.
- Hernández, A., Mateus, C., & Orduz, J. (2014). Características climáticas y balance hídrico de la lima ácida Tahití (*Citrus Latifolia Tanaka*) en cinco productoras de Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 8(2), 217-229. <https://doi.org/10.17584/rcch.2014v8i2.3215>
- Huérffano-Maciado, J. A., & Segura-Garzón, A. D. (2019). *Diagnóstico y optimización del sistema de acueducto veredal ASUARCOPSA de Anapoima entre la bocatoma y la planta de tratamiento* [trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Universidad Católica de Colombia.
- Instituto de Desarrollo Urbano [IDU]. (2019). *Precios Unitarios de Referencia 2018-II + Mano de Obra 2019*. IDU.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). *Estudio Nacional de Agua 2014*. IDEAM.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2014). *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. IGAC.
- López, R. (2003). *Elementos de diseños para acueductos y alcantarillados* (segunda edición). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- López-Mandavera, C. A. (2015). *Medición y control en el servicio al cliente de la empresa de acueducto de Cajicá y como resultado implementar una estrategia para la mejora continua*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Marín, V. (2010). *Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evapotranspiración registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca* [trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Pontificia Universidad Javeriana.
- Martínez-Austria, P. F. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 165-180.
- Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007, 22 de junio). *Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017, 8 de junio). *Resolución 0330 de 2017. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico* (E.C.M.). Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Montaner, M., & Almohalla, E. (1988). Aproximación por el método de Thornthwaite al cálculo de infiltración de lluvia útil. *Papeles de Geografía*, 14, 223-235.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2015). *Colombia. Políticas prioritarias para un desarrollo inclusivo. Mejores políticas*. OCDE.
- Peña, H. (2016). Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y El Caribe. *Recursos Naturales e Infraestructura*, 178, 7-8.
- Pérez-Moreno, F., Prieto-García, F., Rojas-Hernández, A., Galán-Vidal, C. A., Marmolejo-Santillán, Y., Romo-Gómez, C., Castañeda-Ovando, A., Rodríguez-Ávila, J. A., & Barrado-Esteban, E. (2003).

Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. Hidrobiológica, 13(2), 95-102.

Quereda, J. (2005). *Curso de climatología general. El balance hídrico: la evapotranspiración.* Universidad Jaume I.

Sistema de Información de Agua Potable y Saneamiento Básico [SIASAR]. (s.f). *Reporte de respaldo de servicio. Asociación de usuarios del acueducto regional de Anapoima ASUARCOPS.* SIASAR.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019). *Evaluación integral de prestadores Aguas del Tequendama S.A. E.S.P.* Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

MUTIS

REVISTA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

Instrucciones para autores

ENVÍOS DE ARTÍCULOS

La revista *Mutis* acepta permanentemente los siguientes tipos de artículos:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación.
2. Artículo de métodos: documento que presenta la invención o estandarización de un método experimental, computacional, o educativo, entre otros.
3. Artículo de revisión (estado del arte): es una revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias, con el fin de dar cuenta sobre los avances y las tendencias de desarrollo de un campo particular de las ciencias naturales e ingeniería.
4. Comunicación corta: documento que presenta resultados parciales de una investigación en desarrollo cuya publicación sea de gran importancia.

Los trabajos que se presentan a consideración de la revista *Mutis*, se deben enviar a través de nuestro sistema de gestión editorial <http://goo.gl/m6Q6FD> o vía correo electrónico a revista.mutis@utadeo.edu.co (Asunto: artículo revista *Mutis*) en formato de procesador de texto habilitado para modificaciones (Microsoft Word). El artículo debe estar escrito en español o inglés, con una extensión máxima de 25 páginas (incluyendo tablas, figuras y referencias), con márgenes simétricas de 2 cm, sin columnas, con títulos y subtítulos alineados a la izquierda, en letra Times New Roman, tamaño 12 y en espacio doble. Para facilitar el proceso de evaluación, se deben numerar todos los renglones del trabajo. Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Título. El título debe representar con precisión y de manera concisa el contenido del trabajo sin exceder 15 palabras. Se debe escribir con letras tamaño de fuente 16, en minúsculas, en negrilla y alineado a la izquierda, en idioma original y en inglés.

Autores. Debe escribirse nombre completo de los autores, separados por comas y tamaño de fuente 12. No se deben incluir títulos académicos ni las posiciones o cargos que los autores ocupan. Las afiliaciones se deben escribir en este orden: universidad, facultad, programa, laboratorio o grupo (si aplica), dirección, ciudad, país, correo electrónico del autor, número de registro en ORCID y Google Scholar. Ejemplo:

Yvonne Sarmiento Rangel,¹ Ariadna Hazel Vergel^{2*}

¹Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Naturales y Ambientales. Grupo de Investigación Genética, Biología Molecular y Bioinformática – (GENBIMOL), Carrera 4 n.º 22-61, Bogotá D. C., Colombia. CP 011110

²Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT), Apartado 6, Santo Domingo, Villa Clara, Cuba. CP 53000. Correo electrónico: arhazel@inivit.cu <https://orcid.org/xxx>
https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=pTZo5RoA AAAJ&view_op=list_works

Resumen. Debe tener un máximo de 250 palabras. El texto del resumen debe ir en tamaño de fuente 12 Times New Roman. El resumen debe incluir objetivo, métodos, resultados concretos de la investigación y una conclusión general.

Palabras clave. Deben escogerse un máximo de 5 palabras claves. Palabras diferentes incluidas en el título.

Abstract. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del resumen que aparece en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para el resumen en español.

Keywords. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de las palabras clave que aparecen en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para las palabras clave en español.

Introducción. Donde se habla sobre el origen de la investigación, interés y visión general del tema a tratar.

Materiales y métodos. No aplica para artículo de revisión. Descripción detallada de técnicas, equipos y reactivos utilizados en el desarrollo de la investigación.

Resultados. No aplica para artículo de revisión. Donde se hace una presentación clara de los resultados de investigación.

Discusión. Donde se realiza la interpretación y análisis de los resultados de investigación comparándolos con resultados previamente publicados. Pueden presentarse tablas o figuras para sintetizar los resultados. Si se han realizado análisis estadísticos, se deberá describir la procedencia de los datos y el método estadístico empleado.

Conclusiones. Deben basarse en los resultados obtenidos y estar relacionadas con la hipótesis o planteamiento del problema descrito en la introducción.

Ecuaciones. Las ecuaciones se deben escribir centradas con respecto al texto principal y se deben numerar continuamente a lo largo del texto. Cada ecuación debe estar enumerada con un número entre paréntesis ubicado en el margen derecho del texto. El significado y las unidades deben explicarse inmediatamente después de la ecuación en que se utilicen por primera vez.

Cantidades y unidades. Para todas las cantidades numéricas, se debe utilizar una coma para separar los miles y un punto para indicar las cifras decimales. Se recomienda utilizar el Sistema Internacional de Unidades.

Tablas. Las tablas se deben numerar continuamente a lo largo del texto. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra **Tabla** (en negrilla) seguida del número arábigo consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la tabla. Tanto el

encabezado como el contenido de la tabla se deben escribir en tamaño de fuente 10. Solo deben usarse líneas horizontales para separar las entradas de la tabla. No deben usarse líneas verticales para separar las columnas. En el caso de necesitarse algún pie de tabla, este debe estar escrito con tamaño de fuente 8. Las tablas no deben duplicar la información dada en las figuras.

Figuras. Las figuras (o fotografías) se deben numerar de manera consecutiva a lo largo del texto. El rótulo de cada figura debe estar en la parte inferior de la figura y debe incluir la palabra **Figura** (en negrilla) seguida del número arábigo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El rótulo de la figura se debe escribir en tamaño de fuente 10. Las figuras deben incluirse como imágenes originales importadas o copiadas al archivo del trabajo desde una herramienta gráfica (por ejemplo, *Microsoft Excel*) con una resolución de 300 dpi, de tal manera que la legibilidad no se sacrifique cuando el tamaño de las figuras se ajuste durante el proceso de edición. No se publicará por ningún motivo información de fotografías descargadas de internet sin el permiso expreso del autor.

Referencias bibliográficas. Se debe utilizar a lo largo del texto el sistema de citación APA que utiliza los apellidos de autores seguidos del año de publicación entre paréntesis. La lista de las referencias se debe dar al final del documento después de la sección de Conclusiones y debe estar organizada en orden alfabético de acuerdo a la inicial del primer apellido del primer autor. En esta lista solamente se deben colocar las referencias citadas en el texto. Todas las referencias se deben escribir en tamaño de fuente 12 Times New Roman.

EJEMPLOS:

ARTÍCULO

Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of food Engineering*, 58(1), 33-43.

LIBRO

Shames, I. H., & Shames, I. H. (1982). *Mechanics of fluids* (pp. 8-36). New York: McGraw-Hill.

CAPÍTULO DE LIBRO

Bertucco, A. &. (2002). Micronization of a polysaccharide by a supercritical antisolvent technique. En J. &. Williams (ed), *Supercritical Fluids Methods and Protocols*. (pp. 335-412). New Jersey: Humana Press, Inc.

DOCUMENTO DE INTERNET

Benson, T. (Nov. 17, 2005). *Forces on a Rocket*. Consultado en octubre 2, 2008, Disponible en: <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktfor.html>, accesado el XX de XX de XXXX

TESIS DE GRADO

Yépez, B. (2009). *Glicerólisis e hidrólisis de triglicéridos saturados, en dióxido de carbono supercrítico* (tesis doctoral). Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

En caso de dudas, comunicarse con el editor (revista.mutis@utadeo.edu.co). Estas instrucciones quedan supeditadas a los cambios que el Comité Editorial disponga.



ESTA REVISTA ELECTRÓNICA
ES EDITADA POR LA
UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ
JORGE TADEO LOZANO.
SE FINALIZÓ EN 2020