

01

Uso de aguas de producción tratadas de la industria petrolera en sistemas agrícolas y pecuarios

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos
Editores

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

ecoPETROL

01

Uso de aguas de producción tratadas de la industria petrolera en sistemas agrícolas y pecuarios

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos
Editores

Uso de aguas de producción tratadas de la industria petrolera en sistemas agrícolas y agropecuarios /
Édgar Fernando Almansa Manrique [y otros cinco] editado por: Édgar Fernando Almansa Manrique y José
Guillermo Velásquez Penagos -- Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2020.

60 páginas -- (Colección Transformación del agro)
Incluye referencias bibliográficas, tablas y fotos
ISBN obra impresa: 978-958-5461-60-4
ISBN e-Book: 978-958-5461-64-2

1. Uso del agua 2. Tratamiento de aguas residuales 3. Árboles forestales 4. Sostenibilidad 5. Sistemas de riego
6. Llanos orientales (Colombia) I. Almansa Manrique, Édgar Fernando (editor) II. Velásquez Penagos, José
Guillermo (editor).

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia



Corporación Colombiana de Investigación
Agropecuaria, AGROSAVIA, Centro de Investigación
La Libertad. Kilómetro 17, vía Villavicencio-Puerto
López, Meta. Código postal 502007, Colombia.

Ecopetrol S.A. Cl. 40 #24A-71, Villavicencio,
Meta, Colombia

Esta publicación es resultado del proyecto
convenio 5211320 Agrosavia-Ecopetrol titulado
“Aunar esfuerzos técnicos, científicos, operativos
y financieros para el desarrollo de la investigación
del uso y manejo integral de las aguas asociadas
a la producción de hidrocarburos en sistemas
agropecuarios del área de influencia de Ecopetrol”.

Autores

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos
Sonia Lucía Gutiérrez Parrado
Gustavo Adolfo Rodríguez Yzquierdo
Ramón Guillermo González Rodríguez
Julián Andrés Peláez Montoya

Editores

Édgar Fernando Almansa Manrique
José Guillermo Velásquez Penagos

Ecopetrol S.A.

Felipe Bayón Pardo
Presidente

Santiago Martínez Ochoa

Gerente de Desempeño Ambiental
Rubén Darío Collazos Lamilla
Gerente de Desarrollo y Producción Castilla
Sandra Yamile Álvarez Aceros
Líder Palanca de Agua

Juanita de la Hoz Herrera

Gerente de Prosperidad Social
Edwinder Bolaños Rodríguez
Ingeniero de Producción Gerencia Castilla
Yalitza Margarita Sierra Gutiérrez
Líder Ambiental Regional Orinoquia

Agrosavia

Jorge Mario Díaz Luengas

Director Ejecutivo
Mauricio Torres Munevar
Director CI La Libertad
Ariel Hurtado Rodríguez
Director Administrativo y Financiero
Sandra Tatiana Rivero Espitia
Directora de Planeación y Cooperación Institucional

ISBN: 978-958-5461-60-4
Primera edición: 2.000 ejemplares, Bogotá,
Colombia, junio de 2020

Coordinación editorial

Astrid Verónica Bermúdez
Juan Mikán
Andrés Barragán

Corrección de estilo

Luz Ángela Uscátegui Cuellar

Diseño, diagramación e ilustración

.Puntoaparte

Impresión: Panamericana Formas e Impresos

Citación sugerida: Almansa Manrique, E. F. &
Velásquez Penagos, J. G. (2020). *Uso de aguas
de producción tratadas de la industria petrolera
en sistemas agrícolas y pecuarios*. Mosquera,
Colombia: Corporación Colombiana de
Investigación Agropecuaria, Agrosavia.

Cláusula de responsabilidad

Agrosavia y Ecopetrol no son responsables de las
opiniones e información recogidas en el presente
texto. Los autores asumen de manera exclusiva y
plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea
este propio o de terceros, declarando en este último
supuesto que cuentan con la debida autorización de
terceros para su publicación; igualmente, declaran
que no existe conflicto de interés alguno en relación
con los resultados de la investigación propiedad de
tales terceros. En consecuencia, los autores serán
responsables civil, administrativa o penalmente frente
a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros
relativa a los derechos de autor u otros derechos que se
hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente:
018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co/

Agradecimientos

Por el apoyo y colaboración para el desarrollo
del estudio, el grupo de investigación agradece
a Jorge Luis Parra Arango, Diana Patricia Barajas
Pardo, Ciro Ortiz Valdez, Ricardo José Botero Q.,
Zulay Tafur Sanabria, Viviana Romero Ramírez
y Oscar D. Rendón Jaimes; y de AGROSAVIA a
los compañeros Miguel Peña, Guillermo Bueno,
Otoniel Pérez, José Henry Velásquez Penagos,
Guillermo Onofre, Erlinda Nieto, Jeison León,
Alejandro Murcia, James Franco Andrade, Ramón
Gonzáles Zapata, Albert J. Gutiérrez Vanegas,
Orlando Argüello Tovar, Nubia Stella Rodríguez
Hernández, Ruth Lucena Marín Romero.

Por Ecopetrol, agradecemos a Blanca Lupe
Estupiñán, Mauricio Herrera, Wilson De Lacruz,
Giovanni Annicharico, Andrés Zárate, Juan Burgos,
Daniel Torregrosa y Yalitza Sierra.



Contenido



01

Introducción

P. 6



02

Efecto del uso de aguas de producción tratadas en suelo y cultivos, en espacios controlados

P. 12



03

Efectos del uso de agua de producción tratada en el riego de especies forestales

P. 22



04

Efectos del uso de agua de producción tratada en la biodiversidad del ASA

P. 38



05

Efectos del uso de agua de producción tratada en sistemas pecuarios

P. 50

Presentación

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), en cumplimiento de su misión de contribuir al cambio técnico del sector agropecuario, entrega a los productores de los Llanos Orientales y a las autoridades ambientales colombianas los resultados de varios años de investigación, en los cuales se evaluó el uso de aguas de producción tratadas de la industria petrolera de las localidades de Apiay y Castilla La Nueva en sistemas agrícolas y pecuarios.

Para el desarrollo del proyecto se establecieron diferentes ensayos bajo condiciones de invernáculo o espacios controlados con especies vegetales como: caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y pasto elefante (*Penissetum purpureum*). Posteriormente, en condiciones de campo se evaluaron especies forestales tales como: acacia (*Acacia mangium*), melina (*Gmelina arborea*), caucho (*Hevea brasiliensis*), pino (*Pinus caribaea*), eucalipto (*Eucalyptus pellita*) y yopo (*Anadenanthera peregrina*). Además, se analizó el efecto del consumo de aguas de producción tratadas sobre la producción de bovinos y aves de corral.

Los análisis indicaron que no se observan efectos adversos por el uso de aguas de producción tratadas en la producción de especies agrícolas y pecuarias consideradas. Así mismo, no se evidenciaron efectos adversos en la biodiversidad asociada o sobre la calidad de los suelos irrigados.

Los resultados encontrados representan una oportunidad de reúso de aguas de producción tratadas bajo las condiciones específicas del piedemonte de la región del Orinoco, particularmente para la época seca, en la cual, por déficit hídrico, hay limitantes importantes para la producción agrícola y pecuaria.

01

Introducción

Según el último Estudio Nacional del Agua (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2015), la oferta total de agua en el país es de

2,01
billones de metros cúbicos

De este volumen, la industria del petróleo tiene concesionado un total de

67,5
millones de metros cúbicos
que equivale al

0,00336 %
de la oferta total de agua
en Colombia

La totalidad de ese consumo está formalizado mediante concesiones otorgadas por autoridades ambientales.

El petróleo que se extrae de la tierra sale mezclado con aguas, que se conocen como “aguas de producción”, que hacen parte de los fluidos naturales

de los yacimientos. En Colombia, por cada barril de petróleo se producen, en promedio,

13
barriles de agua

Las aguas de producción pueden ser tratadas y reinyectadas en la misma formación para mantener la presión de los yacimientos y aumentar el “factor de recobro”. También pueden ser tratadas y vertidas a cuerpos de agua superficiales o al suelo; o ser reinyectadas en los yacimientos como alternativa de disposición final.

Las “aguas de producción” de los yacimientos del piedemonte de la Orinoquia tienen un contenido relativamente bajo de sales (122 mg. l⁻¹) y no contienen elementos radioactivos. Esta condición genera oportunidades para que, una vez tratadas, se puedan usar en actividades productivas que se desarrollen en predios rurales ubicados en el área de influencia de los proyectos petroleros.

Con el interés de aprovechar esta circunstancia, Agrosavia desarrolló una serie de trabajos de investigación dirigidos a evaluar opciones de utilización de las aguas de producción tratadas para la irrigación en sistemas agropecuarios.

El proyecto se desarrolló en dos fases:



1.

Fase experimental en condiciones controladas (invernáculos y lotes de pasturas): desarrollada en el Centro de Investigación La Libertad de Agrosavia en Villavicencio (Meta) y Estación 2 de Ecopetrol en Castilla La Nueva (Meta), con el fin de evaluar los efectos por el uso del agua de producción tratada en el riego de cultivos de caña y pasto elefante. Además, se evaluó el impacto sobre el crecimiento y desarrollo de ganado vacuno.



El agua usada en los ensayos provenía de los **campos petroleros de Castilla y Apiay** y cumplía con los **límites máximos permisibles establecidos en el Decreto 1594 de 1984** (Ministerio de Agricultura, 1984) para la destinación del recurso agua en sistemas agrícolas y pecuarios. Los estudios se desarrollaron entre los años 2011 y 2015.

2.

Fase de campo: desarrollada en el Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA), Ecopetrol, ubicada en Acacías (Meta). Consistió en escalar los resultados obtenidos en la fase experimental en espacios controlados a un sistema de producción forestal. En esta etapa se evaluó el efecto sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos maderables e industriales regados con agua de producción tratada. Se monitorearon permanentemente los efectos sobre la calidad física, química y biológica del suelo. Adicionalmente se analizó el efecto del cambio de uso del suelo sobre la biodiversidad y abundancia de las especies nativas.



Áreas de estudio

Centro de Investigación La Libertad de Agrosavia

Se trabajó en espacios controlados con cultivos de caña de azúcar y pasto elefante, y sistemas de producción pecuarios.



Altitud

El CI La Libertad está ubicado en el km 17 vía Villavicencio-Puerto López, en el departamento del Meta, a una altitud de 336 m s. n. m. (figura 1).



Precipitación

El centro está localizado en una terraza aluvial del piedemonte llanero donde las precipitaciones oscilan entre los 2.500 a 3.000 mm anuales, y con temperatura media de 26 °C, con oscilaciones entre 23 y 30 °C.



Humedad

La humedad relativa varía entre 70 % y 85 % para las épocas seca y lluviosa respectivamente.



Suelos

Los suelos, según la clasificación del IGAC por capacidad de uso y manejo de las tierras, son clase agrológica IV, de topografía plana, con texturas medias (franco-arcillo-arenoso), contenidos de materia orgánica entre 2 % a 3 % y pH de moderado a fuertemente ácido (IGAC, 2004).



Figura 1. Centro de Investigación de Agrosavia La Libertad. **Fuente:** Google Earth (s.f.b)

El estudio de campo fue realizado en el Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA)



Altitud

El ASA se encuentra dentro del paisaje de piedemonte, a una altura de 363 m s. n. m.



Precipitación

Su precipitación media anual es de aproximadamente 2.500 mm. Presenta un periodo de lluvias comprendido entre los meses de abril y noviembre y otro de marcada sequía entre diciembre y marzo.



Temperatura

La temperatura promedio es mayor a 25 °C durante todo el año y presenta una humedad relativa del 82 % en los meses lluviosos, y del 70 % en los meses secos (Ideam, 2015).



Suelos

En cuanto a suelos se refiere, la zona pertenece a la subclase agrológica VI-s1 que se relaciona con actividades de ganadería semiintensiva, pastos de corte, producción de algunos frutales, sistemas de agroforestería y especies maderables (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2004).



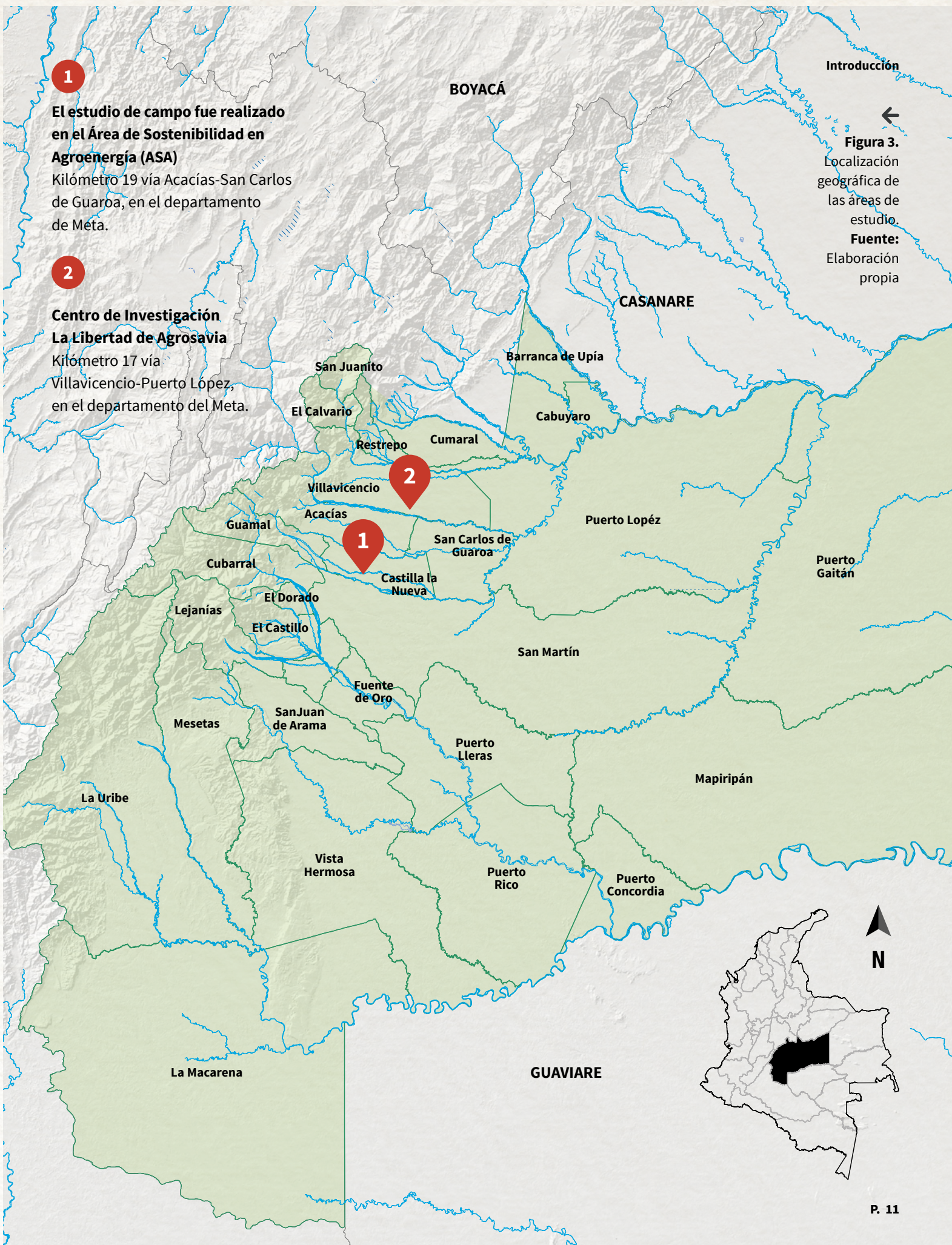
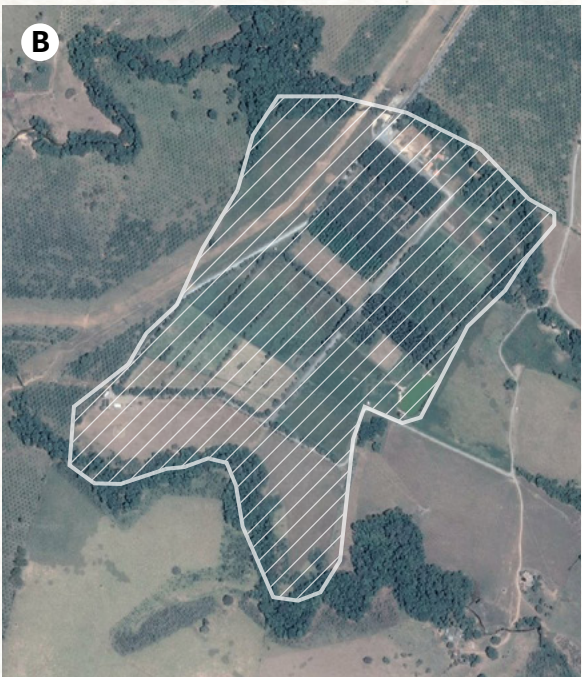
Vegetación

Inicialmente, la vegetación predominante estaba representada por pasto tipo *Brachiaria* sp. En el predio ASA se realizaron estudios agrícolas (edáficos, forestales, hidrológicos), pecuarios (ganado bovino y aves) (figura 2) y de biodiversidad (avifauna, mastofauna, anfibios y reptiles).



Figura 2. Localización geográfica del área de estudio en el ASA. a. Distribución espacial de las áreas de pasturas, agrícolas y forestales estudiadas; b. Delimitación del área de estudio con imagen satelital.

Fuente: Google Earth (s.f.a)



02

**Efecto del uso de
aguas de producción
tratadas en suelo y
cultivos, en espacios
controlados**



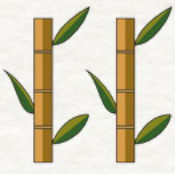


Metodología

Para el monitoreo del efecto de las aguas de producción tratadas en suelos y cultivos bajo condiciones controladas, se utilizó la técnica de lisímetros plásticos con fondo (área superficial 1 m²).

1

Cada lisímetro se llenó con un volumen de suelo previamente caracterizado fisicoquímicamente. Los lisímetros correspondían a la unidad experimental a evaluar y fueron sembrados con:



Caña de azúcar
(*Saccharum officinarum*)



Pasto elefante
(*Penisetum purpureum*)



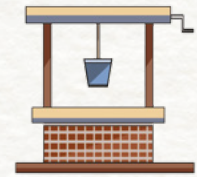
Suelo desnudo
(Muestra de control de la evapotranspiración)

2

Se realizaron dos riegos semanales con dos tipos de aguas:



Agua de producción tratada de la estación de Apiay



Agua de pozo profundo del CI La Libertad

3

Se utilizaron dos dotaciones hídricas, una para mantener el suelo a capacidad de campo¹ (100 %) y otra con suministro inferior (80 % del volumen para mantener el suelo a capacidad de campo).

4

Se realizaron tres ensayos en forma independiente: caña de azúcar, pasto y suelo sin cultivo.

5

El diseño experimental fue completamente aleatorizado con cuatro tratamientos (agua de pozo profundo y de producción tratada a dos niveles de humedad del suelo) en un suelo de textura franco arcilloso arenoso (FArA) y tres repeticiones.

6

Al comparar la calidad del agua usada con los criterios de calidad admisibles establecidos en la normatividad ambiental vigente durante el periodo de ejecución del estudio (Decreto 1594 de 1984), se observa que las aguas de producción tratadas de Apiay cumplieron con todos los criterios exigidos para uso agrícola y pecuario. En el ensayo en suelo, se evaluaron cada 6 meses las siguientes propiedades edáficas:



Físicas: densidad aparente, porosidad total (método del cilindro) y estabilidad de agregados, técnica utilizada Yoder (IGAC, 2006).

↓ **Tabla 1.** Calidad de agua de producción tratada y agua de pozo profundo utilizadas en los experimentos*

Parámetro	Agua de producción de Apiay	Agua de pozo de La Libertad
Conductividad (µS.cm ⁻¹)	1.220	38,5
Cloruros (mg.l ⁻¹)	215	<3,3
Calcio (mg.l ⁻¹)	9,35	1,21
Magnesio (mg.l ⁻¹)	2,67	0,38
Sodio (mg.l ⁻¹)	104	1,58
Manganeso (mg.l ⁻¹)	0,22	<0,079
Bario (mg.l ⁻¹)	1,04	<0,096
Cadmio (mg.l ⁻¹)	<0,01	<0,01
Mercurio (mg.l ⁻¹)	<0,002	<0,001
Molibdeno (mg.l ⁻¹)	<0,106	<0,01
Arsénico (mg.l ⁻¹)	0,0005	0,0004
Relación de adsorción de sodio (RAS)	7,7	0,32
Hidrocarburos totales (mg.l ⁻¹)	0,74	<0,67
Grasas y aceites (mg.l ⁻¹)	4,77	-
Sólidos suspendidos totales (mg.l ⁻¹)	13,27	-

* Promedio de cuatro años de registro de 16 monitoreos trimestrales



Químicas: conductividad eléctrica (conductímetro en extracto de saturación); pH (relación suelo agua 1:1); contenidos de Ca, Mg, K y Na (extracción con acetato de amonio y determinación por absorción atómica); concentración de metales pesados (Cd, Cr, Pb, Ba; método de digestión de ácido nítrico, clorhídrico y peróxido de hidrógeno con espectrofotometría de absorción atómica) (IGAC, 2006).



Ambientales: contenido de hidrocarburos totales de petróleo (extracción por ultrasonido/infrarrojo).

En los cultivos se evaluó el rendimiento expresado en materia verde generada por la planta (t.ha⁻¹) durante varios ciclos (cuatro y seis ciclos de corte para caña de azúcar y pasto elefante respectivamente). Los ensayos fueron realizados de manera continua durante los cinco años del estudio. Adicionalmente, se hizo semanalmente el monitoreo de cada tipo de agua para determinar conductividad eléctrica, salinidad, pH y temperatura.



Resultados

Propiedades físicas del suelo

En los suelos regados al 100 % y 80 % de capacidad de campo con aguas de producción tratadas, se encontraron valores significativamente más altos de densidad aparente y porosidad en comparación con los regados con agua de pozo. Estos valores se encuentran dentro del rango normal (densidad aparente entre 1,1 a 1,5 mg.m³ y porosidad entre 40 y 55%) que permite una adecuada aireación y movimiento del agua en suelos de los Llanos Orientales.

La estabilidad de agregados se midió a través de la estimación del diámetro ponderado medio (DPM)².



→ **Tabla 2.** Propiedades físicas del suelo regado con aguas de producción tratadas y aguas de pozo profundo
Fuente: Elaboración propia

En este coeficiente un mayor valor indica más estabilidad de los agregados del suelo, lo cual favorece el desarrollo radicular de los cultivos. Adicionalmente, disminuye el riesgo de degradación por procesos de sellado superficial y escorrentía.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Van Bavel (1949), los resultados demuestran que las mejores condiciones de estabilidad de los agregados (clasificados como medianamente estables) se presentan en los suelos regados con aguas de producción tratadas, mientras que los suelos regados con aguas de pozo profundo presentaron agregados ligeramente estables (tabla 2).

2. Rangos para interpretar la estabilidad estructural del suelo con relación al DPM. Inestable: <0,5; ligeramente estable: 0,5-1,5; moderadamente estable: 1,5-3,0; estable: 3,0-5,0; muy estable: >5,0.



E100: aguas de producción tratadas a capacidad de campo; E80: aguas de producción tratadas a 80% capacidad de campo; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a 80% de capacidad de campo. Letras diferentes para cada parámetro representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p<0,05).

Propiedades químicas del suelo

En términos generales, se presentó una mayor concentración en todos los cationes evaluados en los suelos regados con aguas de producción tratadas, frente al suelo regado con agua de pozo profundo. Además, el agua de producción tratada causó incrementos en la conductividad eléctrica y pH del suelo (tabla 3).

Para el caso del calcio y del potasio, el riego con aguas de producción tratadas aumentó la cantidad disponible del ion en el suelo, mientras que en el riego con aguas de pozo profundo las cantidades tienden a ser deficientes.

En relación con la conductividad eléctrica, en el caso de los suelos regados con aguas de producción tratadas, se obtuvieron incrementos en su contenido con respecto a aquellos que fueron regados con aguas provenientes de pozo profundo.

Con respecto al pH, se obtuvieron valores cercanos a condiciones neutras con el uso de aguas de producción tratadas, mientras que los suelos regados con aguas de pozo profundo mantuvieron su condición natural de pH, con condiciones ligeramente ácidas.

Por lo tanto, puede concluirse que las aguas de producción tratadas mejoraron las condiciones químicas del suelo, lo que se evidencia tanto en el aumento del contenido de potasio, calcio y magnesio, así en lo referente a la mejora de las condiciones de pH.

Estos resultados permiten concluir que las aguas de producción tratadas no afectan las condiciones químicas del suelo. Tampoco generan riesgo o toxicidad de los elementos. Contribuyen a mejorar la capacidad química del suelo para la producción vegetal, ya que incrementan la capacidad de intercambio catiónico y reducen la acidez del suelo.



Efecto del uso de aguas de producción tratadas en suelo y cultivos, en espacios controlados

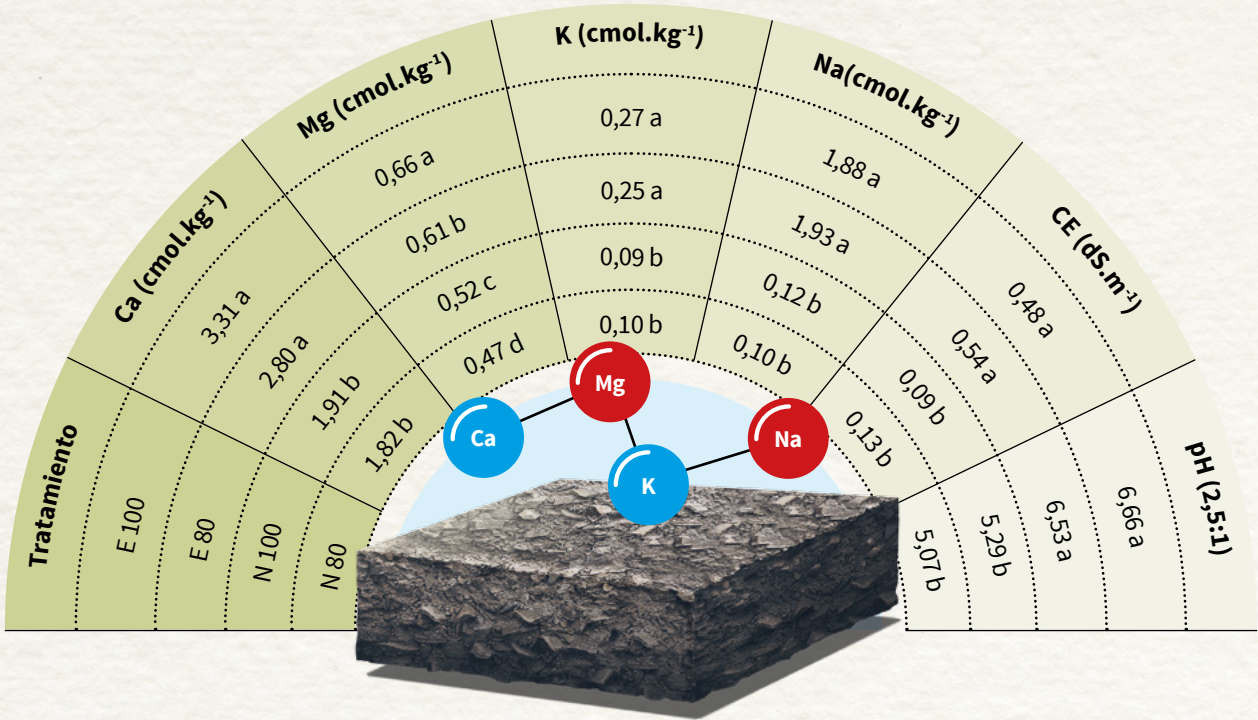
Para analizar la presencia de los niveles permisibles de metales pesados en el suelo, se utilizó como referencia la norma canadiense para la protección del medio ambiente y la protección humana (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007). Dicha normativa define los límites permisibles para cadmio (1,4 mg.kg⁻¹), bario (760 mg.kg⁻¹), cromo (64 mg.kg⁻¹) y plomo (70 mg.kg⁻¹), entre otros.

Los resultados del contenido de metales pesados en suelos regados con aguas de producción tratadas se presentan en la tabla 4. En todos los casos los valores de metales pesados en el suelo se encuentran por debajo de los límites permisibles exigidos en la normativa canadiense. Por lo anterior, se podría concluir que el uso de aguas de producción tratadas con fines de riego no presenta riesgos por acumulación de metales pesados.

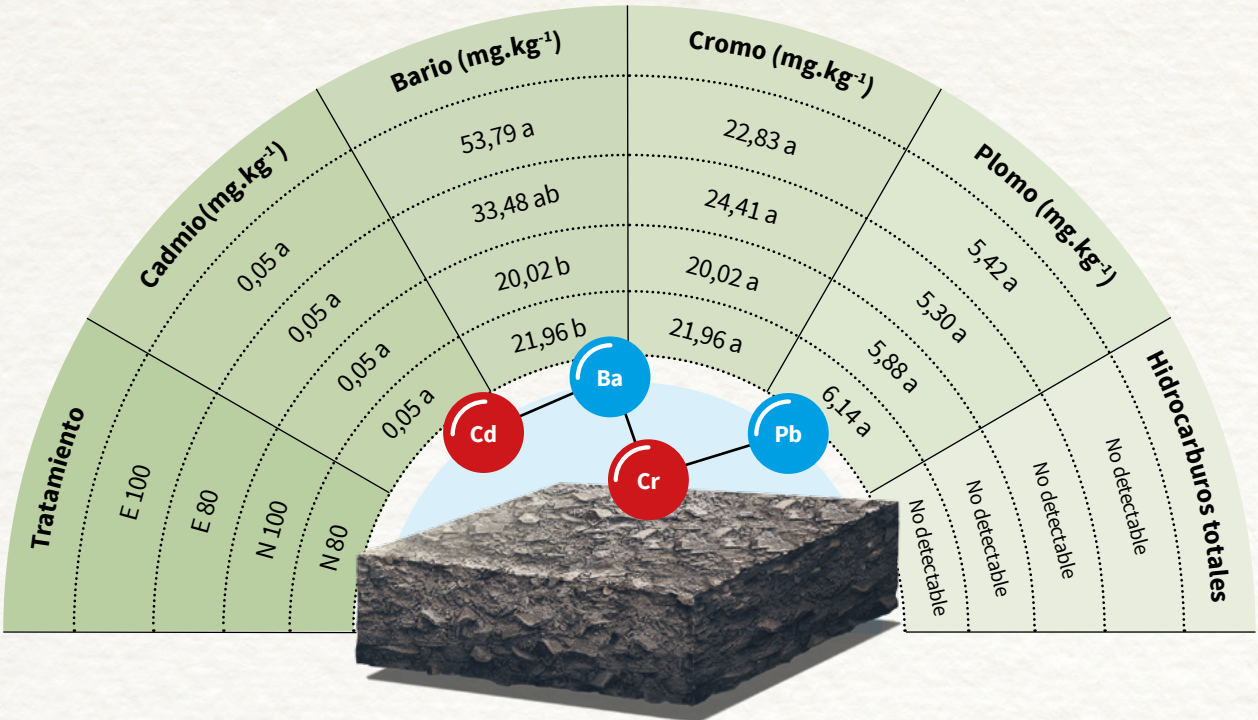
En la tabla 4 se observa que para los hidrocarburos totales se presentaron valores no detectables (menores a 0,00625%), que están por debajo de los límites establecidos en la normativa mexicana (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013) para uso de suelo predominante agrícola, forestal, pecuario y de conservación.

En tal sentido, no se evidencian riesgos por el uso de agua de producción tratada asociados al contenido de hidrocarburos totales en el suelo, de acuerdo con la normativa mexicana.

→ **Tabla 3.** Propiedades químicas del suelo regado con aguas de producción tratadas y aguas de pozo profundo. **Fuente:** Elaboración propia



→ **Tabla 4.** Concentración de metales pesados (mg.kg⁻¹) e hidrocarburos totales en suelo regado con aguas de producción tratadas y aguas de pozo profundo. **Fuente:** Elaboración propia

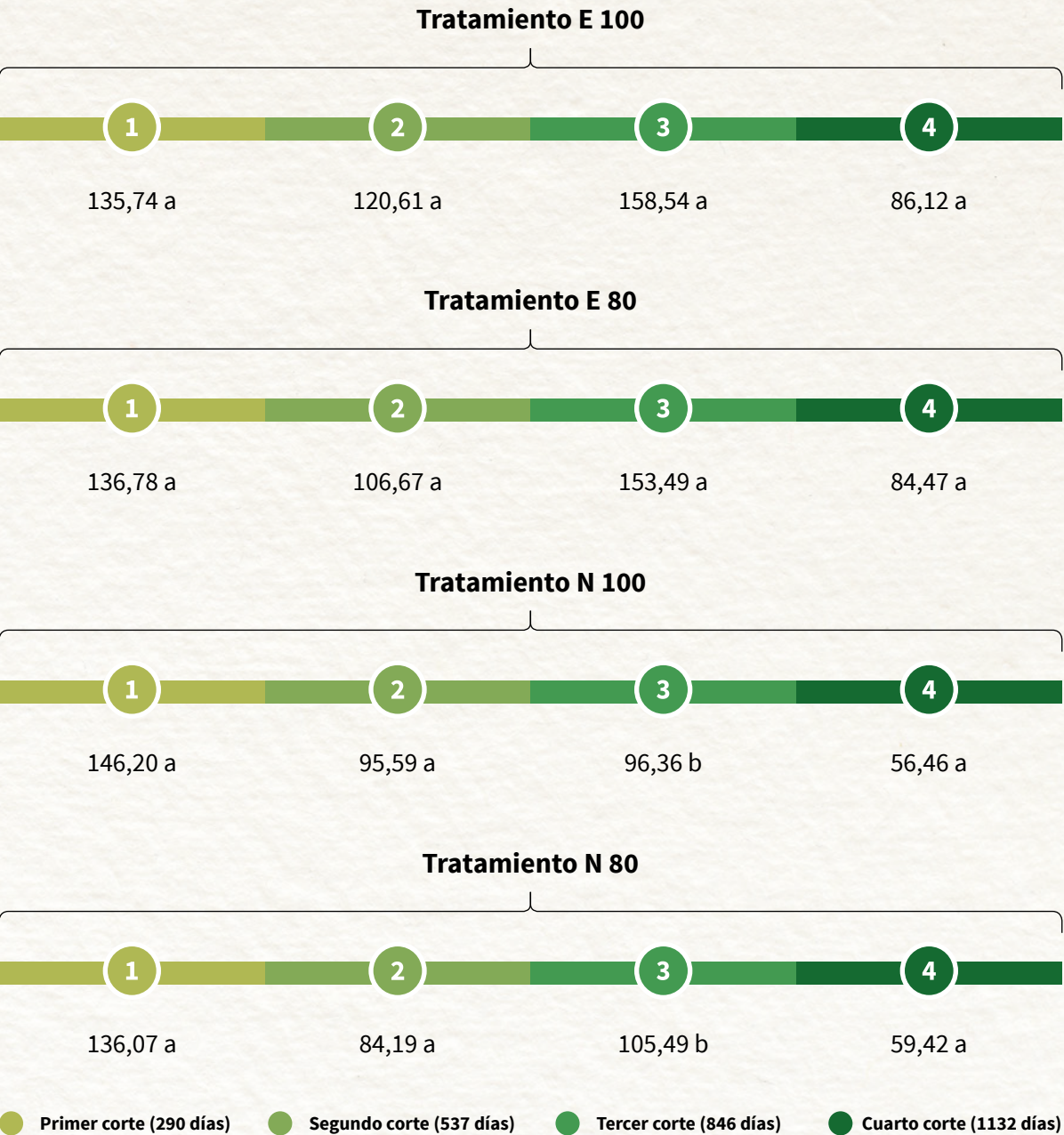


E100: aguas de producción tratadas a capacidad de campo; E80: aguas de producción tratadas a 80% capacidad de campo; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a 80% de capacidad de campo. CE: conductividad eléctrica. Letras diferentes dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

Desarrollo y crecimiento de cultivos

En las tablas 5 y 6 se muestran los resultados de rendimiento de biomasa (materia fresca) durante varios ciclos continuos de producción para el cultivo de caña de azúcar y pasto elefante respectivamente. Se realizaron evaluaciones

de ambos cultivos usando como riego agua de producción tratada y agua de pozo profundo, a dos contenidos de humedad del suelo (100 % capacidad de campo y 80 % de capacidad de campo) (figura 4).



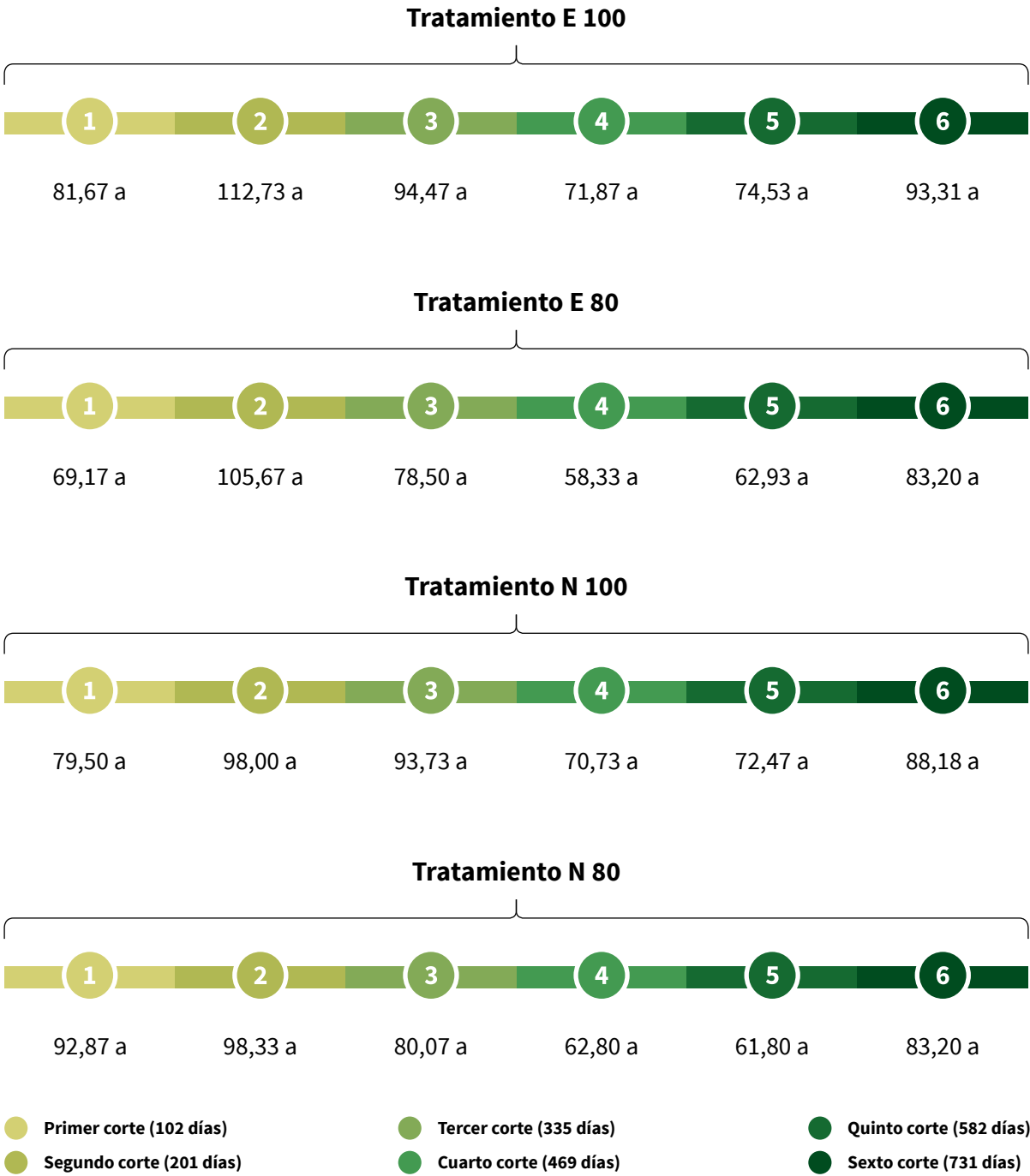
E100: agua de producción tratada a capacidad de campo; E80: agua de producción tratada a 80% capacidad de campo; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a 80% de capacidad de campo. Letras diferentes dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p<0,05).

Efecto del uso de aguas de producción tratadas en suelo y cultivos, en espacios controlados

← **Tabla 5.** Materia fresca (t.ha⁻¹) para el cultivo de caña de azúcar durante cuatro ciclos continuos de producción regados con aguas de producción tratadas y aguas de pozo profundo. **Fuente:** Elaboración propia



Tabla 6. Materia fresca (t.ha⁻¹) para el cultivo de pasto elefante durante seis ciclos continuos de producción regados con aguas de producción tratadas y aguas de pozo profundo.
Fuente: Elaboración propia



E100: agua de producción tratada a capacidad de campo; E80: aguas de producción tratadas a 80%; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a 80% de capacidad de campo. Letras diferentes dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p<0,05$).

Los resultados obtenidos no muestran efecto en los rendimientos de los cultivos evaluados por el uso para riego de agua de producción tratada. Se presentaron algunas diferencias respecto al corte, que permiten concluir que, según este estudio, el uso de aguas de producción tratadas al 100%, tienen un efecto positivo en el crecimiento de la caña de azúcar y el pasto elefante.

En todos los casos los mayores rendimientos se obtuvieron con el uso de aguas de producción tratadas, sin importar el contenido de humedad del suelo. Por tal razón, se puede concluir que no se presentan efectos por el uso de aguas de producción tratadas sobre el rendimiento de los cultivos en un ciclo de cuatro años de producción.



Efecto del uso de aguas de producción tratadas en suelo y cultivos, en espacios controlados



Figura 4. Ensayos controlados de cultivos y suelos regados con aguas de producción tratadas y aguas de pozo profundo.
Foto: Julián Andrés Peláez Montoya

A photograph of a small stream flowing through a forest. The stream is bordered by concrete structures, possibly a weir or a small dam. The water is clear and reflects the surrounding greenery. The forest is lush with tall grasses and various trees. The overall scene is peaceful and natural.

03

Efectos del uso de agua de producción tratada en el riego de especies forestales



Metodología

Los resultados obtenidos en la fase de investigación en espacios controlados permitieron planificar el escalamiento del uso de aguas de producción tratadas en sistemas agroforestales.

Se establecieron diferentes arreglos de especies vegetales con base en dos criterios. El primero considera el potencial de cada especie en la generación de bioenergía, y el segundo toma en cuenta la adaptabilidad de las especies al ecosistema de la zona.

A partir de lo anterior, se eligieron seis especies vegetales que fueron previamente evaluadas bajo riego en condiciones de invernadero. De estas, cinco presentan potencial de producción de biomasa y una potencial de uso industrial (látex - caucho).

Se utilizaron unidades experimentales de una hectárea. Cada unidad se dividió en tres subunidades iguales, y en cada una de estas se tomaron los muestreos correspondientes. Se obtuvieron tres repeticiones de cada unidad por cada época de muestreo en un área total de 6 ha (figura 5).

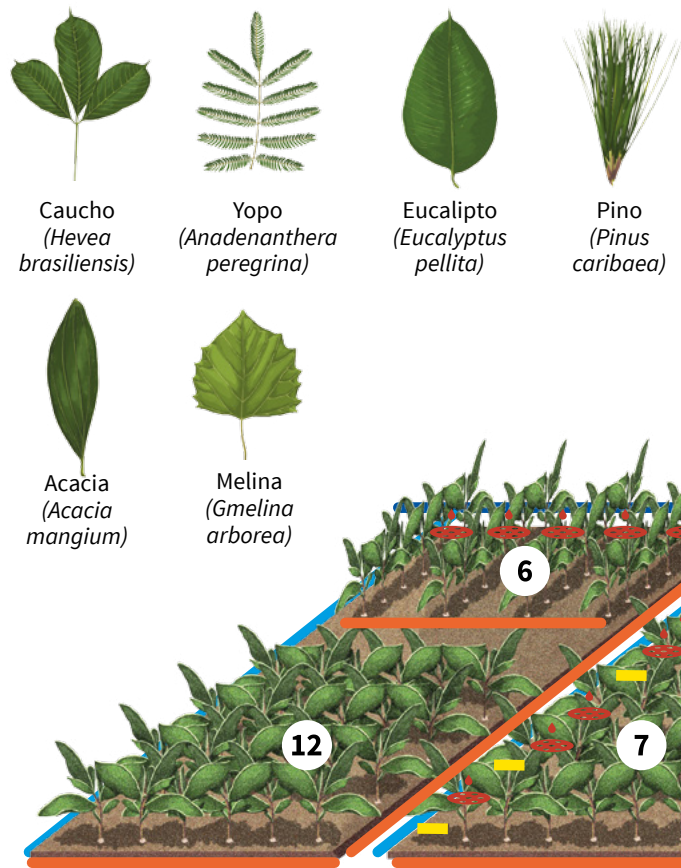


Figura 5. Estado del ASA antes y después del modelo agroforestal de regado con aguas de producción tratadas. a. Mosaico fotográfico pancromático del ASA en su condición inicial; b. Mosaico fotográfico pancromático del ASA en su condición final de adecuación de las obras civiles y las parcelas de investigación. Fuente: Google Earth



Sistema de riego

En el Área de Sostenibilidad en Agroenergía (ASA) se estableció un sistema de riego por gravedad superficial de melgas rectangulares aprovechando la pendiente del terreno para distribuir el agua y mojar la mayor cantidad de área posible. El caudal de diseño fue de 129 litros por segundo, lo que equivale a 70.000 barriles de agua por día, con jornadas de riego de 24 horas, 7 días a la semana.

Los componentes del sistema de riego fueron:

- 1 Dos módulos o bloques de riego.
- 2 Cada módulo de riego presentaba: un canal de riego principal y canales de riego secundario (los cuales distribuyen el agua a cada parcela) para su posterior aplicación.
- 3 Sobre cada canal de riego secundario se ubicaron, en función de las curvas de nivel, unas estructuras denominadas trinchos (conformadas por paredes de cemento y tablas de plástico), con el objetivo de lograr la altura de lámina de agua necesaria, para permitir el flujo de agua por medio de sifones a las melgas ubicadas a lo largo de la línea de árboles en los sistemas forestales (figura 6).

Variables y frecuencia de monitoreo

Se evaluaron tres componentes con interés agronómico para todas las áreas de monitoreo: agua, suelo y especie forestal.

- 1 En el componente agua, se monitoreó caudal y calidad del agua de riego semanalmente con análisis de lectura rápida como pH, salinidad y conductividad y cada seis meses se evaluaron los parámetros exigidos en la normatividad colombiana vigente³.
- 2 En el componente suelo, se analizaron las características químicas, físicas, microbiológicas, presencia de hidrocarburos y metales pesados para cada especie forestal por cinco años.
- 3 El componente forestal incluyó el monitoreo directo de las variables altura total del árbol y diámetro a la altura del pecho (DAP), evaluadas inicialmente de manera mensual durante el primer año de desarrollo. Posteriormente se realizó una medición cada 6 meses hasta finalizar el tiempo de evaluación.

3. Se consideraron los parámetros y límites máximos permisibles establecidos en los artículos 40 y 41 del Decreto 1594 de 1984, que establece los criterios admisibles para la destinación del recurso agua en sistemas agrícolas y pecuarios.



Figura 6. Plano del sistema de riego por gravedad implementado en el ASA. Fuente: Elaboración propia

- Canal primario
- Canal secundario
- Canal de drenaje
- Sifón
- Trincho

1. Palma de aceite
2. Caucho
3. Melina
4. Área de ensayo con riego y sin riego
5. Acacia
6. Pino
7. Eucalipto pellita
8. Área de ensayo de densidades
9. Yopo
10. Jatropha
11. Otros
12. Guadua



Resultados

Componente agua

En la tabla 7 se presenta el promedio de los diferentes parámetros de calidad del agua en cinco años de monitoreo, comparándolos con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad colombiana vigente. Para todas las variables

evaluadas los valores siempre cumplieron la normativa vigente e incluso presentaron rangos inferiores a los permitidos para aguas de riego en los sistemas agrícolas y pecuarios (tabla 7).

La presencia de hidrocarburos en el agua de producción tratada estuvo entre: menos de 0,05 y 3,04 mg.l⁻¹ con una media de 2,04 mg.l⁻¹. El pH del agua tratada usada para riego estuvo en el rango entre 6 y 9 unidades, con un promedio de 7,5. En el caso de la salinidad se observaron valores en un rango entre 0,6 y 1,2 g.l, con un promedio de 0,78 g.l.

Referencia	Contenidos en agua			Decreto 1594 de 1984	
	Mínimo	Medio	Máximo	Artículo 40 Uso agrícola	Artículo 41 Uso pecuario
Aluminio (Al) (mg.l ⁻¹)	0,0256	<3,508	4,365	5	5
Arsénico (As) (mg.l ⁻¹)	0,00013	<0,00013	0,0127	0,1	0,2
Berilio (Be) (mg.l ⁻¹)	0,000182	<0,00042	0,00314	0,1	NR
Cadmio (Cd) (mg.l ⁻¹)	0,00002	<0,000026	0,0068	0,01	0,05
Zinc (Zn) (mg.l ⁻¹)	0,00375	0,003756	0,152	2	25
Cobalto (Co) (mg.l ⁻¹)	0,00032	<0,000322	0,0034	0,05	NR
Cobre (Cu) (mg.l ⁻¹)	0,000525	<0,002102	0,0029	0,2	0,5
Cromo Cr ⁺⁶ (mg.l ⁻¹)	0,0002	0,000238	0,0015	0,1	1
Hierro (Fe) (mg.l ⁻¹)	1,24	1,877	2,634	5	NR
Litio (Li) (mg.l ⁻¹)	0,154	0,1975	0,213	2,5	NR
Manganeso (Mn) (mg.l ⁻¹)	0,0836	0,10896	0,153	0,2	NR
Molibdeno (Mo) (mg.l ⁻¹)	0,000029	<0,000099	0,00068	0,01	NR
Níquel (Ni) (mg.l ⁻¹)	0,00096	0,000662	0,0166	0,2	NR
Plomo (Pb) (mg.l ⁻¹)	0,00013	<0,000284	0,021	5	0,1
Selenio (Se) (mg.l ⁻¹)	0,000389	<0,000860	0,0085	0,02	NR
Vanadio (V) (mg.l ⁻¹)	0,001	0,001115	0,0332	0,1	NR
Boro (mg.l ⁻¹)	0,08	0,1235	0,17	0,3.4.0	5
Cloruros Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	35,5	122	174	NR	NR
Sodio (Na) (mg.l ⁻¹)	8,39	41,2	77,92	NR	NR
Bario (Ba) (mg.l ⁻¹)	0,0015	0,575	1,01	NR	NR
Mercurio (Hg) (mg.l ⁻¹)	0,00042	<0,002	0,001	NR	0,01
Hidrocarburos totales (mg.l ⁻¹)	<0,05	2,04	3,04	NR	NR
Conductividad (µS.cm ⁻¹)	587	601	741	Reportar	NR
pH	6,43	7,5	7,38	4,5-9,0 unidades	NR
RAS	2,09	3,33	5,31	Reportar	NR

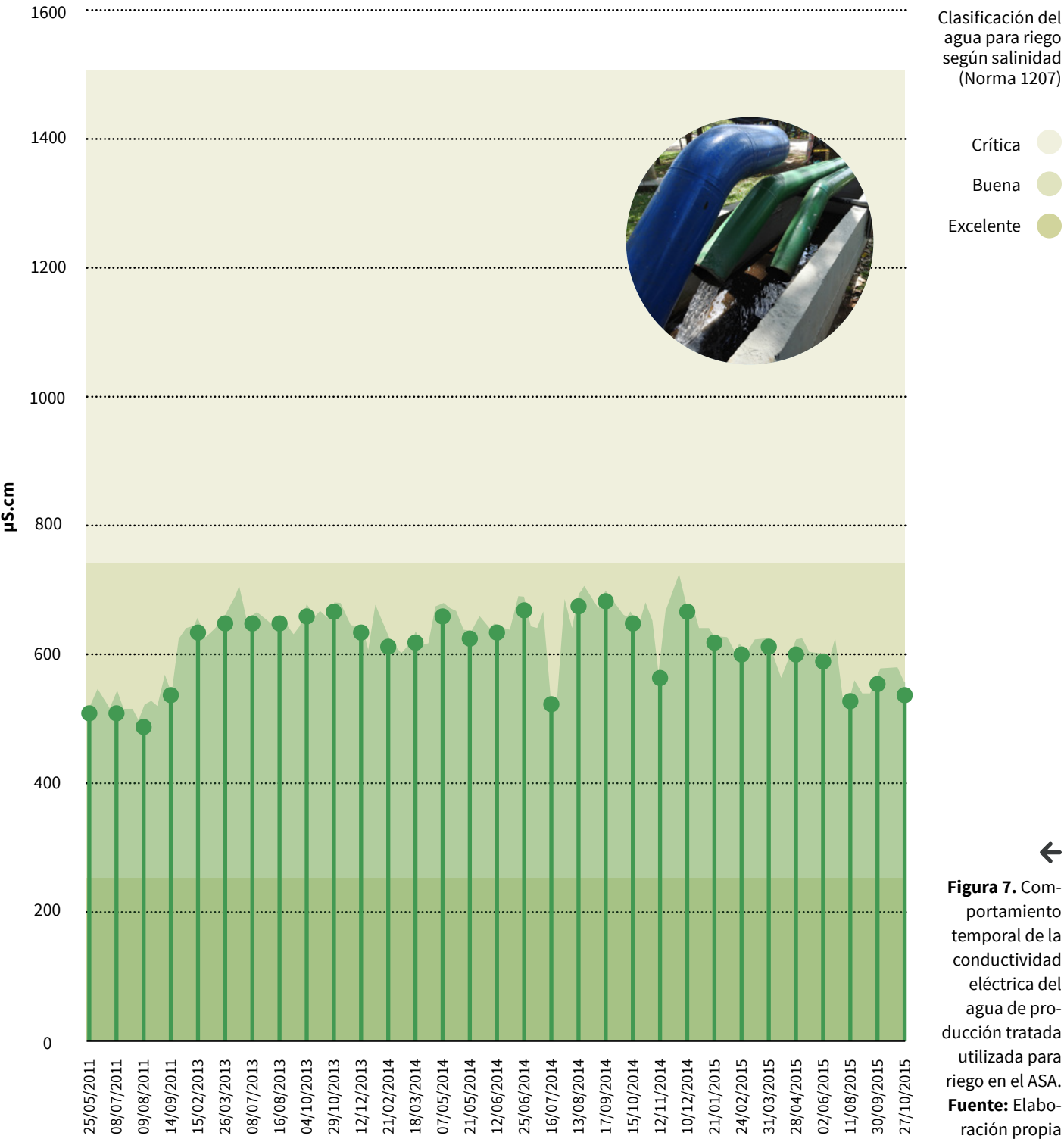


Tabla 7. Parámetros de calidad del agua de producción tratada utilizada para riego en el ASA
Fuente: Elaboración propia

Una de las variables con mayor significado en los análisis de calidad de aguas de riego es la conductividad eléctrica. Esta es una medida indirecta de la concentración de iones en solución (principalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio). Según la legislación ambiental colombiana (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), se aceptan como aguas residuales tratadas

aptas para riego aquellas que presentan una conductividad eléctrica menor a 1.500 µS.cm.

La conductividad eléctrica de las aguas utilizadas para riego osciló, en cinco años de medición, entre 410 a 650 µS.cm. Por lo tanto, consistentemente, tuvo características adecuadas para uso en sistemas agropecuarios (figura 7).



Efectos del uso de agua de producción tratada en el riego de especies forestales

Componente suelo

Propiedades químicas

Se evaluaron los parámetros de pH, materia orgánica (MO), Ca, Mg, K, Na y conductividad eléctrica en el suelo de las parcelas sembradas con las diferentes especies sometidas a riego con agua de producción tratada. En la tabla 8 se presentan los valores medios de los elementos mayores del suelo registrados en cada parcela de investigación.

→ **Tabla 8.** Elementos mayores del suelo para diferentes parcelas regadas con agua de producción tratada
Fuente: Elaboración propia

	Acacia	
	pH	5,31 b
	MO (%)	2,58 b
	Ca (cmol.kg ⁻¹)	1,54 a
	Mg (cmol.kg ⁻¹)	0,33 b
	K (cmol.kg ⁻¹)	0,11 b
	Na (cmol.kg ⁻¹)	0,21 a
	CE (µS.cm ⁻¹)	0,14 ab
	Caucho	
	pH	5,50 a
	MO (%)	2,40 bc
	Ca (cmol.kg ⁻¹)	1,74 a
	Mg (cmol.kg ⁻¹)	0,35 b
	K (cmol.kg ⁻¹)	0,10 b
	Na (cmol.kg ⁻¹)	0,20 a
	CE (µS.cm ⁻¹)	0,15 a
	Eucalipto	
	pH	5,37 ab
	MO (%)	2,30 c
	Ca (cmol.kg ⁻¹)	1,56 a
	Mg (cmol.kg ⁻¹)	0,35 b
	K (cmol.kg ⁻¹)	0,12 b
	Na (cmol.kg ⁻¹)	0,18 a
	CE (µS.cm ⁻¹)	0,11 b
	Melina	
	pH	5,37 ab
	MO (%)	2,76 ab
	Ca (cmol.kg ⁻¹)	1,68 a
	Mg (cmol.kg ⁻¹)	0,33 b
	K (cmol.kg ⁻¹)	0,08 b
	Na (cmol.kg ⁻¹)	0,21 a
	CE (µS.cm ⁻¹)	0,12 ab
	Pino	
	pH	5,61 a
	MO (%)	2,44 bc
	Ca (cmol.kg ⁻¹)	1,86 a
	Mg (cmol.kg ⁻¹)	0,48 a
	K (cmol.kg ⁻¹)	0,10 b
	Na (cmol.kg ⁻¹)	0,15 a
	CE (µS.cm ⁻¹)	0,13 ab
	Yopo	
	pH	5,24 b
	MO (%)	2,86 a
	Ca (cmol.kg ⁻¹)	1,66 a
	Mg (cmol.kg ⁻¹)	0,39 b
	K (cmol.kg ⁻¹)	0,18 a
	Na (cmol.kg ⁻¹)	0,18 a
	CE (µS.cm ⁻¹)	0,14 ab

Los valores corresponden a la media de 30 observaciones (tres repeticiones por especie con frecuencia semestral por cinco años). Letras diferentes en un mismo parámetro entre especies se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

Antes del riego

pH	4,5
MO (%)	4,5
Ca (cmol.kg ⁻¹)	0,53
Mg (cmol.kg ⁻¹)	0,10
K (cmol.kg ⁻¹)	0,09
Na (cmol.kg ⁻¹)	0,06
CE (µS.cm ⁻¹)	0,06

El valor inicial de pH del suelo era de 4,5. Después del riego con agua de producción tratada se registró en las seis parcelas un aumento de esta variable, que fue significativamente diferente en dos rangos: pino y caucho con el mayor aumento en pH y un segundo grupo entre los cultivos de: acacia, eucalipto, melina y yopo que presentaron valores similares de pH, en un intervalo entre 5,37 y 5,24 (tabla 8).

El aumento del pH en suelos ácidos naturales permite mejorar la disponibilidad de nutrientes para las plantas. A medida que el pH se va acercando a la neutralidad, aumenta la disponibilidad de los nutrientes para las plantas y estos no quedan retenidos en el suelo, por lo cual el desarrollo y productividad de los cultivos es mayor. Según la norma mexicana (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013), se pasó de un suelo fuertemente ácido (<5) a moderadamente ácido (>5,1 <6,5).

El contenido de materia orgánica reportaba un valor inicial de 4,5%. Después del establecimiento de las especies forestales con aplicación de riego con agua de producción tratada, esta variable disminuyó y se observaron diferencias significativas en el suelo de las parcelas con yopo, acacia y eucalipto, con valores que oscilan entre 2,30 % y 2,86 %, los cuales se consideran normales de acuerdo a la clasificación de Rioja (2002). El descenso en la materia orgánica del suelo se debe a una mayor mineralización de la misma promovida por la práctica de riego, la cual mejora el contenido de humedad del suelo y, con ello, el aumento de la actividad microbiana que realizan dichos procesos. Además de ello, al tener establecidos cultivos forestales, las plantas hacen uso de la materia orgánica por medio de la absorción de nitrógeno proveniente de dicha mineralización.

El valor inicial de Ca registrado en el suelo era de 0,53 cmol.kg⁻¹. Cinco años después de regar las especies forestales con agua de producción tratada el valor de Ca osciló entre 1,86 y 1,54 cmol.kg⁻¹, sin diferencias entre las parcelas sembradas con las diferentes especies forestales. Estos valores se consideran adecuados para las condiciones de los Llanos Orientales (Amézquita, Thomas, Rao, Molina, & Hoyos 2004).

El nivel de Mg registrado inicialmente en el suelo fue de 0,10 cmol.kg⁻¹, y al final del periodo de estudio el contenido de este elemento osciló entre 0,48 y 0,33

cmol.kg⁻¹, en las 6 parcelas. En la parcela sembrada con pino, el contenido de magnesio en suelo registró un incremento significativo respecto a las otras parcelas. Se considera que los contenidos de Mg son bajos para las condiciones de los Llanos Orientales según Jamioy (2011) y Jamioy, Menivar y Rubiano (2015).

El contenido de K en suelo al inicio de la investigación registró un valor medio de 0,09 cmol.kg⁻¹. Cinco años después de regar las especies forestales con agua de producción tratada, se observa que el contenido de K del suelo oscila entre 0,08 y 0,18 cmol.kg⁻¹, con diferencias significativas respecto al último valor, que corresponde a la parcela sembrada con yopo. Estos valores se consideran adecuados para los Llanos Orientales según Jamioy (2011).

El contenido de Na inicial en el suelo fue de 0,06 cmol.kg⁻¹, valor que incrementó ligeramente con la siembra y riego, sin embargo, no se presentaron diferencias significativas entre las parcelas evaluadas. Al final de la investigación los contenidos de Na registraron valores entre 0,15 y 0,21 cmol.kg⁻¹. De acuerdo con Rioja (2002), valores de Na menores a 0,3 cmol.kg⁻¹ se consideran muy bajos.



La conductividad eléctrica registrada en cada parcela presentó un aumento después de regar el suelo con agua de producción tratada, esto debido fundamentalmente a que dichas aguas contienen cierto nivel de sales. Al final del estudio se presentan diferencias significativas entre las parcelas de caucho y eucalipto, con valores que oscilan entre 0,11 y 0,15 dS.m. Estos valores no representan riesgo de salinidad para el desarrollo de las plantas de acuerdo con Rioja (2002).

Efectos del uso de agua de producción tratada en el riego de especies forestales

Propiedades físicas

Durante los cinco años de investigación, las propiedades físicas del suelo: densidad aparente, porosidad total y conductividad hidráulica no presentaron diferencias significativas entre las diferentes parcelas. Sin embargo, al final del estudio la estabilidad estructural presentó diferencias entre las parcelas, donde las de mejor agregación fueron las sembradas con melina, pino y eucalipto, y la de menor agregación fue la de acacia (tabla 9A).

Montenegro (2003) indica que valores de diámetro ponderado medio (DPM) para estabilidad de agregados entre 1,5 mm y 3,0 mm se interpretan como suelos moderadamente estables y valores entre 3,0 mm y 5,0 mm como estables. Dentro de la primera categoría estarían las parcelas sembradas con acacia, caucho, eucalipto y yopo; mientras que en la segunda categoría se tendrían las parcelas de melina y pino. Los valores de estabilidad estructural y conductividad hidráulica aumentaron con respecto a las condiciones iniciales del suelo.

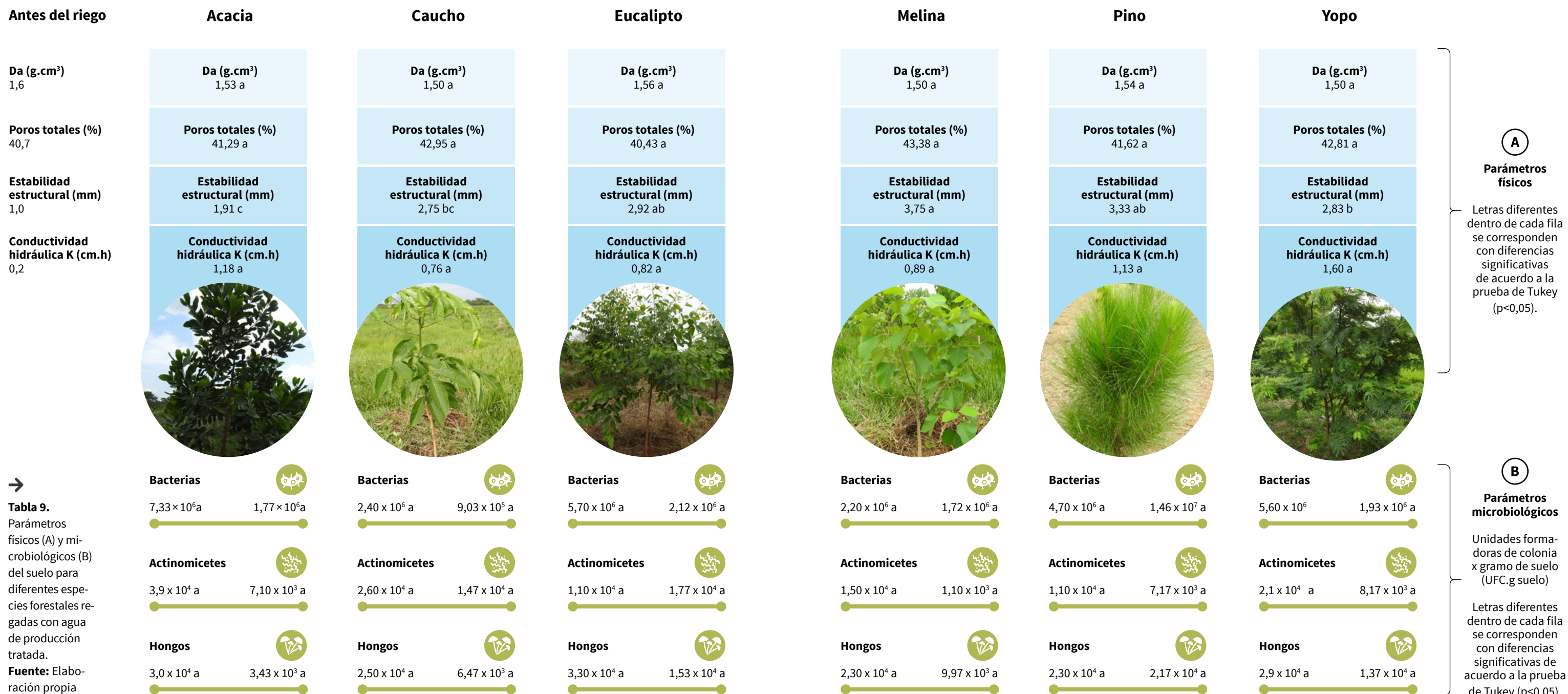
Propiedades biológicas

La calidad del suelo depende, entre otras, de las propiedades físicas y químicas y de la composición microbial. Los microorganismos son responsables de la dinámica de transformación y desarrollo de la fracción mineral y tienen múltiples funciones en la sanidad y nutrición de las plantas.

En la tabla 9B se presenta el resultado de los parámetros microbiológicos del suelo monitoreados durante la investigación, en cada una de las parcelas

experimentales. Para esto, se hizo conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) de hongos, bacterias y actinomicetos al inicio y al final del periodo de evaluación del crecimiento de las plantas. No se encontraron diferencias significativas en la población de los microorganismos del suelo para las parcelas sembradas con las diferentes especies, para ninguno de los tiempos de evaluación. Se observó disminución de las poblaciones de bacterias, actinomicetos y hongos después de la siembra y riego, debido a la homogenización típica y disminución de la abundancia de microorganismos causada por el laboreo y manejo del suelo.

Efectos del uso de agua de producción tratada en el riego de especies forestales



Hidrocarburos y metales pesados

En condiciones experimentales y después de cinco años continuos de riego con agua de producción tratada, en las diferentes parcelas forestales no se registraron valores que se consideren perjudiciales, de acuerdo con la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades del gobierno de los Estados Unidos de América (2014) (tabla 10).

Para todas las parcelas forestales el contenido de hidrocarburos totales durante el estudio y al final del mismo fue inferior al rango detectable <0,00625%. Adicionalmente, durante la investigación se evaluó la acumulación de metales pesados en el suelo en las diferentes parcelas forestales, considerando los

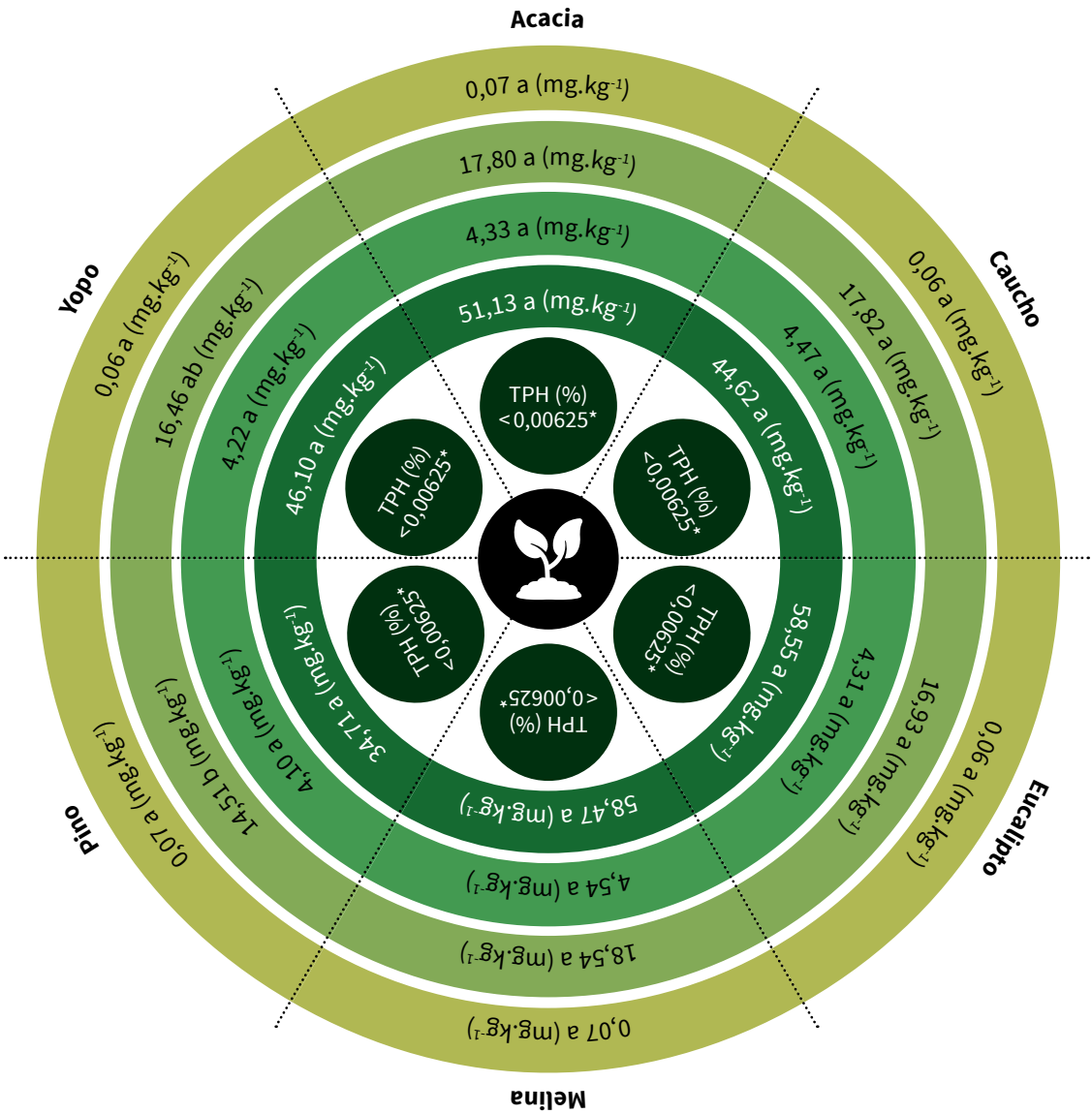
elementos: bario (Ba), plomo (Pb), cromo (Cr) y cadmio (Cd). Estos niveles se compararon con la norma canadiense (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2007) para la protección del medio ambiente y la protección humana, la cual considera los siguientes límites como permisibles en el suelo: bario (Ba): 760 mg.kg⁻¹, cadmio (Cd): 1,4 mg.kg⁻¹, cromo (Cr): 64 mg.kg⁻¹ y plomo (Pb): 70 mg.kg⁻¹.

Después de cinco años de regar con agua de producción tratada, los valores registrados en las parcelas forestales siempre fueron inferiores a los límites permisibles establecidos en la norma canadiense, lo cual indica que las aguas de producción tratadas no favorecieron la acumulación de metales pesados en el suelo.



Tabla 10. Hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y contenido de metales pesados en el suelo para diferentes parcelas sembradas con especies forestales regadas con agua de producción tratada.
Fuente: Elaboración propia

- Cadmio (Cd)
- Cromo (Cr)
- Plomo (Pb)
- Bario (Ba)



*Los valores corresponden a la media de 30 observaciones (tres repeticiones por especie con frecuencia semestral por cinco años). Letras diferentes en una misma columna corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).

Componente forestal

Como se mencionó, se evaluó el crecimiento y desarrollo de seis especies: cinco con uso forestal o producción de biomasa (acacia, melina, eucalipto, yopo y pino) y una especie con uso industrial tipo látex (caucho), las cuales tuvieron riego con aguas de producción tratadas durante cinco años de seguimien-

to. La lámina de riego suministrada a cada parcela forestal se describe en la tabla 14. En el año 2015 se observa disminución de la lámina de riego, de acuerdo a lo establecido en la normativa ambiental colombiana que fue expedida en ese momento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Efectos del uso de agua de producción tratada en el riego de especies forestales

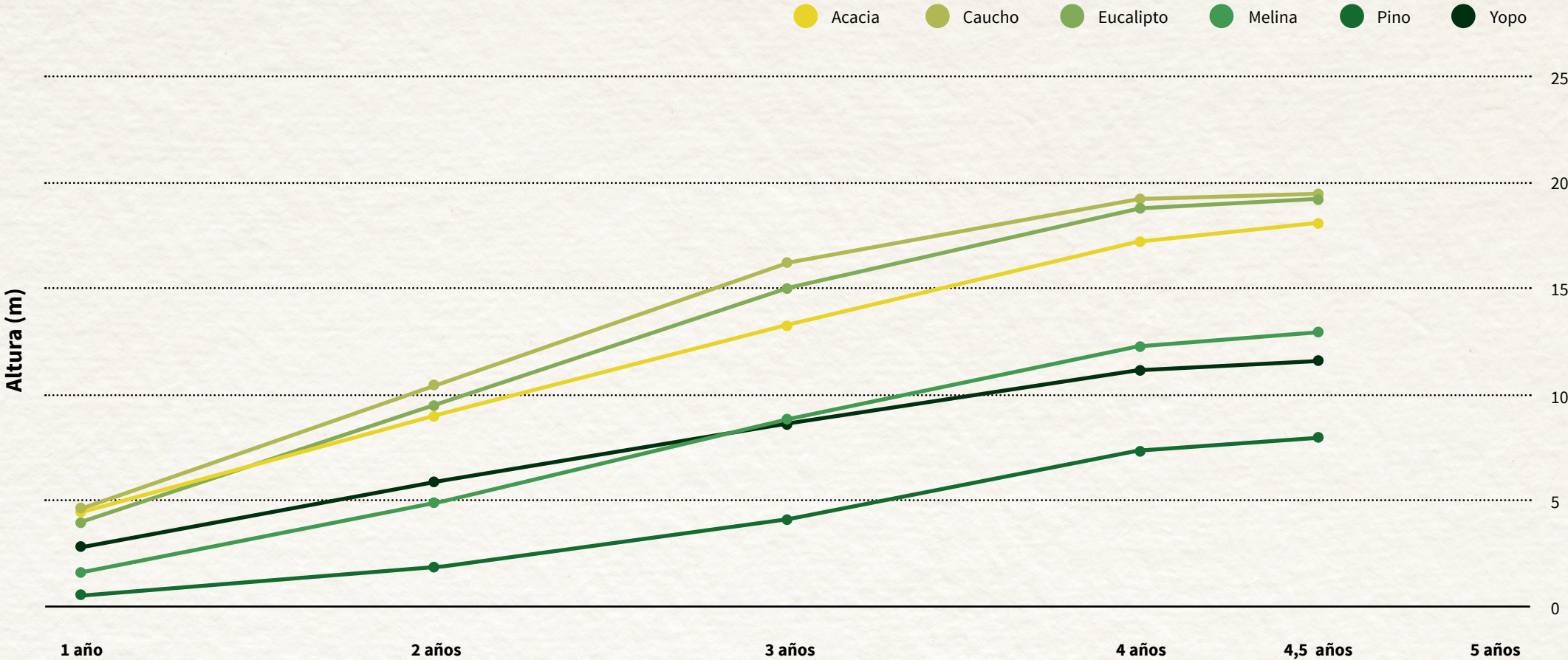


Tabla 11. Lámina de riego suministrada a las diferentes parcelas forestales.
Fuente: Elaboración propia

La especie que registró la mayor altura al final de la investigación fue el eucalipto (19,81 m), y en orden descendente continuaron: melina (19,74 m), acacia (19,08 m), caucho (13,60 m), yopo (12,02 m) y pino (8,59 m).

En la figura 8 se presenta el crecimiento temporal de los árboles de las distintas especies en los 4,5 años de evaluación. En esta figura se observan claramente dos grupos, uno de crecimiento rápido (especies comerciales foráneas) y otro de crecimiento más lento (nativas del continente americano).

De acuerdo a los datos de referencia regional o internacional las seis especies estudiadas tuvieron un buen comportamiento y crecimiento en términos de altura. Lo anterior está directamente relacionado con la producción de biomasa o látex. En la tabla 12 se presenta la relación con valores de referencia.

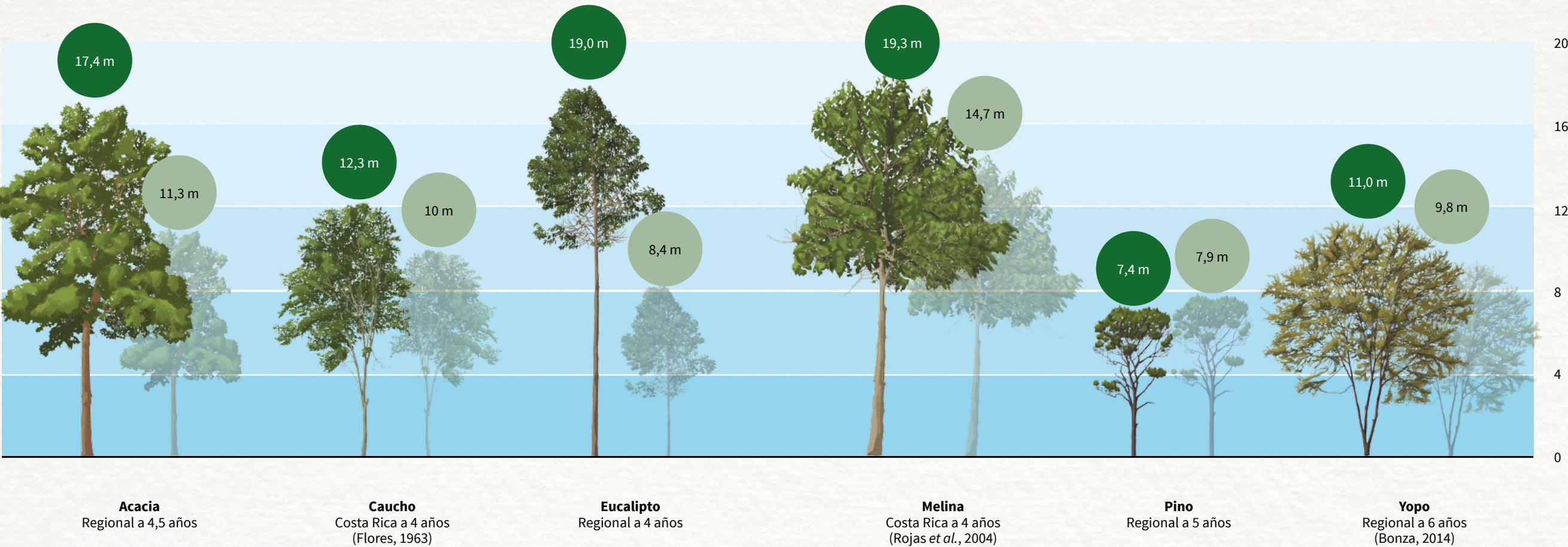


Efectos del uso de agua de producción tratada en el riego de especies forestales

Figura 8. Comportamiento del crecimiento anual de las diferentes especies forestales regadas con agua de producción tratada. **Fuente:** Elaboración propia



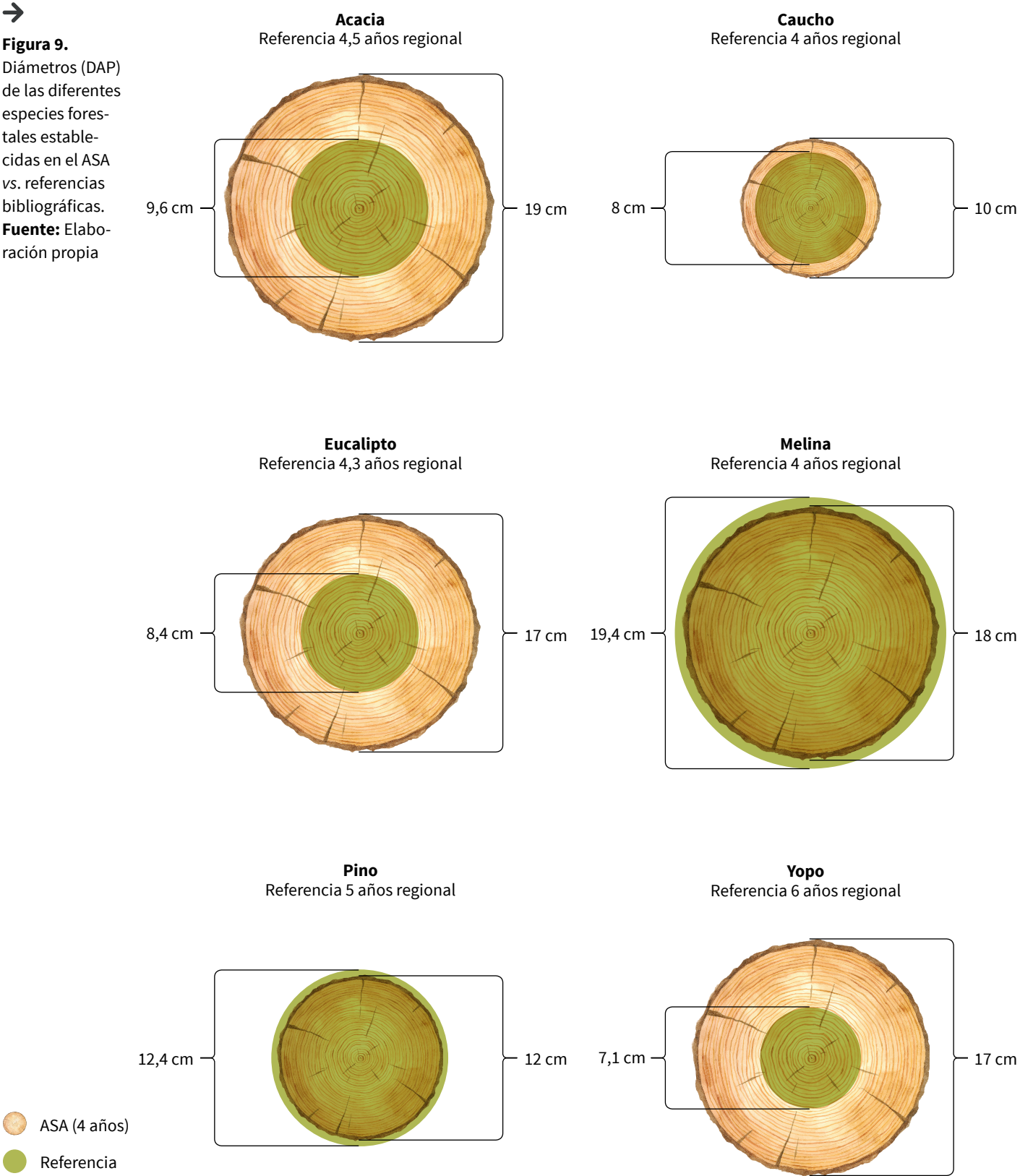
Tabla 12. Comparación en altura de las especies forestales establecidas en el ASA con algunas referencias bibliográficas. **Fuente:** Elaboración propia



ASA altura m (4 años)
Datos de referencia (altura m)

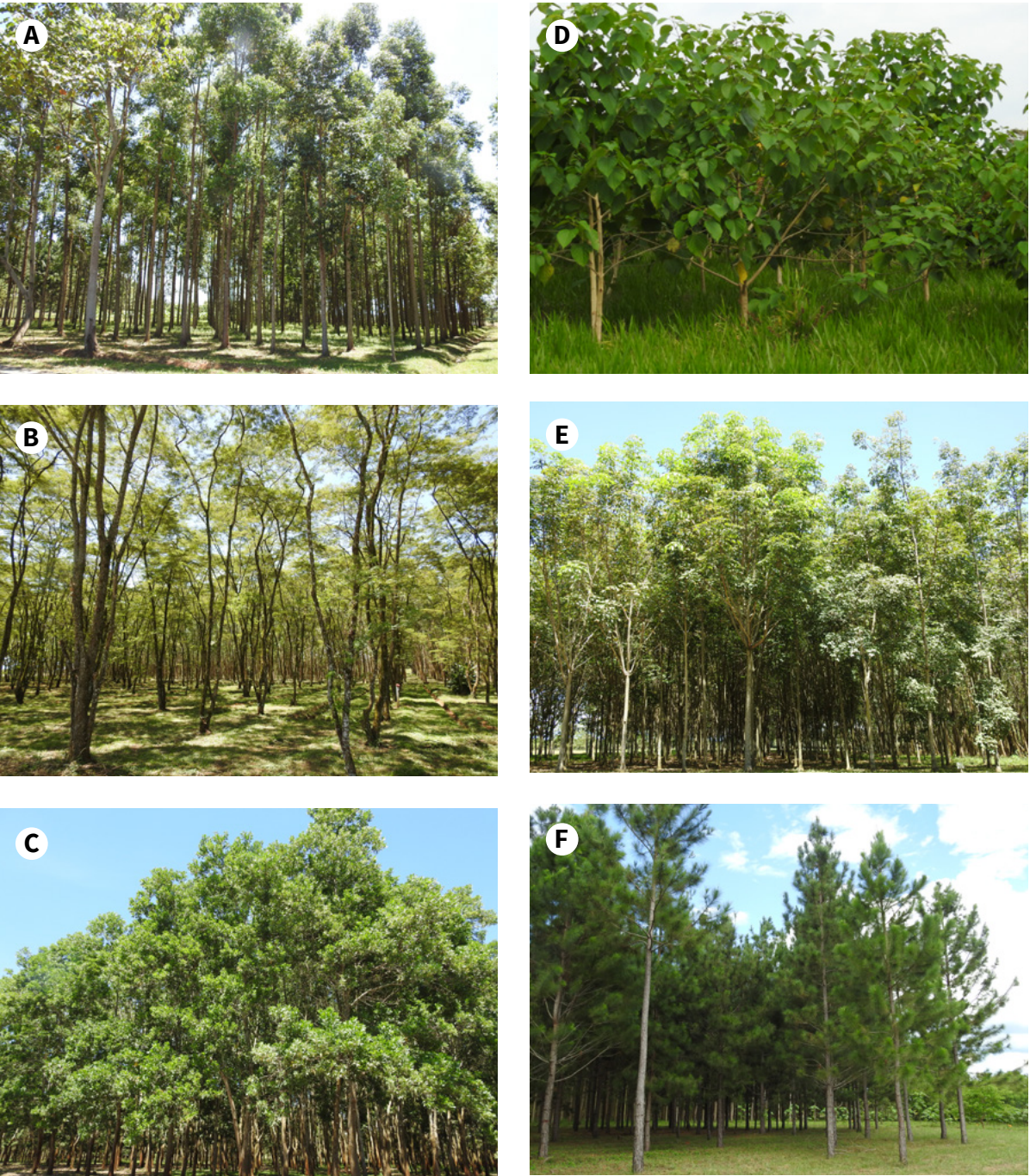
En relación con el diámetro a la altura de pecho (DAP), se encontró que las especies forestales presen-

taron un mayor diámetro a los cinco años en comparación con referencias regionales (figuras 9 y 10).



Conclusiones

Se concluye que el riego de las seis especies forestales con agua de producción tratada mejoró el crecimiento y rendimiento de los árboles. Además, no se evidenciaron efectos en la salud y calidad del suelo.



Efectos del uso de agua de producción tratada en el riego de especies forestales

←

Figura 10. Estado de las diferentes especies forestales establecidas en el ASA al final de la investigación.

- A. Eucalipto
- B. Yopo
- C. Acacia
- D. Melina
- E. Caucho
- F. Pino

Fuente: Elaboración propia

04

Efectos del uso de agua de producción tratada en la biodiversidad del ASA





Metodología

La estación ASA está conformada por 46 ha que fueron delimitadas y organizadas conservando zonas para la restauración ambiental (reforestación), dentro de las cuales se implementaron 22 ha de cultivos forestales.

Para la primera fase del proyecto ASA, se realizó la caracterización de la fauna silvestre y se registraron las especies observadas en el área de estudio. En sus inicios, esta zona presentaba una cobertura vegetal de pastizales introducidos de *Brachiaria humidicola* y *B. decumbens*, especies para el pastoreo de ganado en un sistema productivo extensivo o semiextensivo típico de la región.

El ASA presenta dos linderos con fragmentos de bosque de ribera del caño Bijao y caño Danta. Estos fragmentos no superan los cinco metros de ancho. En este escenario, se realizó un levantamiento de la línea base de las especies silvestres asociadas al ASA, que en su mayoría correspondían a especies con un tipo de hábitat dominado por pastizales y espacios abiertos. Otras especies fueron registradas en la zona de transición entre el lindero de los bosques de ribera de los caños y el potrero (figura 11).



Vista aérea de las zonas del ASA. Adecuación del terreno

Para la segunda fase, dentro del ASA se delimitaron cuatro zonas que tuvieron manejos particulares:

- ① La laguna
- ② Las parcelas forestales
- ③ El sistema silvopastoril
- ④ El caño Danta (a) y el caño Bijao (b) (límites de la zona de influencia) para la recuperación por reforestación ecológica de las zonas de ribera.



En estas condiciones, el trabajo de campo se desarrolló mediante recorridos que permitieran facilitar el registro de fauna silvestre, adecuando las diferentes metodologías de estudio para cada grupo taxonómico a monitorear: aves, mamíferos (voladores y no voladores), anfibios y reptiles.

Principalmente se realizó un muestreo de encuentro visual (*visual encounter survey* [VES]). Este consiste en inventariar fauna en un sitio particular para generar un listado de especies presentes en el lugar determinado (Foster, 2012). En algunos casos, se tomaron puntos fijos de 15-20 minutos en lugares donde reposaban varias especies.



Figura 11.
Estado del ASA.
Fuente:
Elaboración propia

Avifauna

Se realizaron caminatas diarias dentro de la zona de influencia del proyecto. Los horarios de observación se iniciaban a las 06:00 hasta las 11:00 y de 16:30 a 18:30 horas (las especies observadas fuera de este horario se registraron dentro del muestreo). Se realizaron recorridos de observación (VES) en las diferentes coberturas del suelo: pastizales, parcelas del sistema agroforestal y bordes de bosque de los caños Danta y Bijao, en la zona que limita con el ASA.

Por sus características biológicas, taxonomía e historia natural conocida y estable, su fácil observación y su amplia distribución, este grupo se tomó como indicador para estimar el efecto del cambio

en el uso del suelo sobre el estado de conservación del ASA (Villarreal *et al.*, 2006). Todas las especies observadas se registraron fotográficamente y posteriormente fueron identificadas con ayuda de guías taxonómicas y consulta a ornitólogos de la región.

Mastofauna

La mastofauna se dividió en dos grupos: mamíferos no voladores y mamíferos voladores (murciélagos).

Para monitorear los pequeños roedores se emplearon trampas Sherman (figura 12) y para los mamíferos medianos se emplearon trampas Thomahawk (figura 13). Las trampas se ubicaron en los senderos de los bosques de ribera y en las parcelas forestales. Los

puntos establecidos se marcaron con cinta plástica. Las trampas fueron cebadas con alimentos específicos por cada tipo de animal y fueron revisadas dos veces por día durante 10 días en las dos épocas del año, húmeda y seca, durante cinco años.

Para monitorear los mamíferos voladores (quirópteros) se emplearon redes de niebla⁴ (figura 14). Estas redes fueron dispuestas entre la transición de la sabana y el bosque de ribera, y en claros dentro del bosque de ribera. Se hicieron mediciones dos

veces por semana durante cinco años, con un turno de muestreo entre las 19:00 y las 23:00 con revisiones cada hora.

Herpetofauna

Para este grupo conformado por anfibios y reptiles se utilizó la metodología VES. Se realizaron, en su mayoría, caminatas nocturnas (y diurnas para algunos lagartos y serpientes). El recorrido se iniciaba desde las 19:00 y finalizaba a las 23:00 al menos una vez por semana durante cinco años. Se realizaron recorridos cerca de cuerpos de agua, dentro del bosque de ribera y en las praderas del área de influencia del proyecto. Las especies observadas se registraron fotográficamente.

Efectos del uso de agua de producción tratada en la biodiversidad del ASA





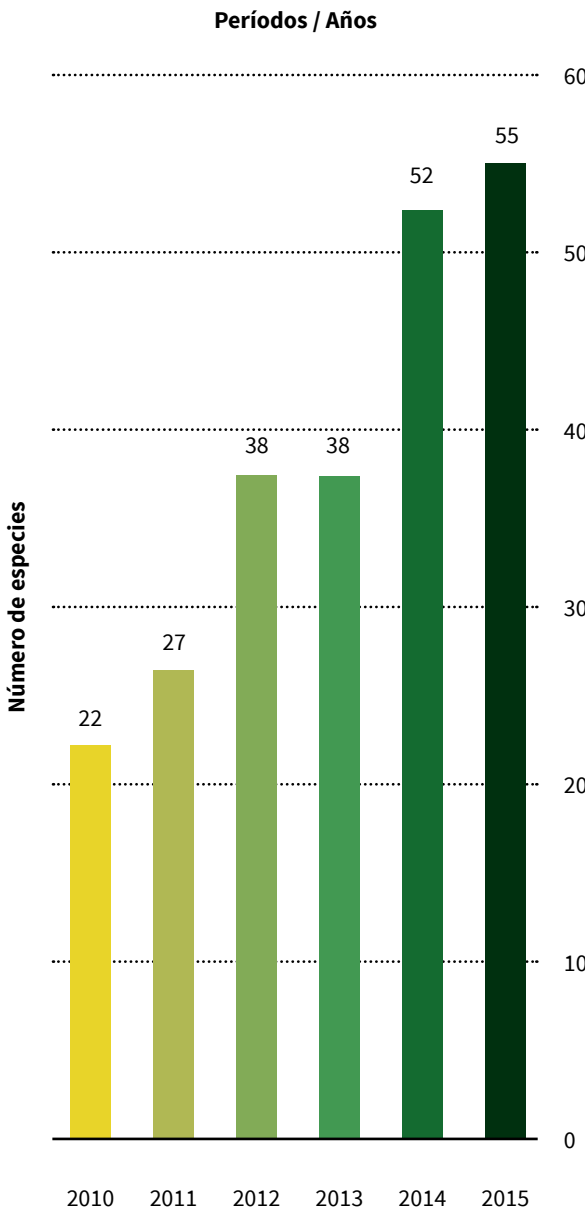
Resultados

Avifauna

Se observó un incremento en el número de especies de aves durante los seis periodos anuales de monitoreo (figura 15). Dicho aumento posiblemente está relacionado con el cambio en el uso y cobertura del suelo. Esto por cuanto la nueva cobertura se constituye en un hábitat más adecuado para el desarrollo de estas especies.



Figura 15. Número de especies de aves observadas en el ASA.
Fuente: Elaboración propia



Dentro del conjunto de aves se observó un total de 9 familias y 16 especies de Passeriformes (pájaros cantores). Esta gran variedad se debe a la capacidad que tienen estas especies para colonizar gran parte de hábitats en los diferentes ecosistemas. Cumplen un papel importante en los procesos ecológicos naturales, ya sea como controladores biológicos, polinizadores o dispersores de semillas (Hilty & Brown, 2009; Kattan, Serrano & Aparicio, 1996) (figura 16).



Figura 16. Passeriformes observadas en el ASA.
Fuente: Elaboración propia



Sirirí tijereta
(*Tyrannus savana*)



Chirlobirlo
(*Sturnella magna*)



Saltarín barbiblanco
(*Manacus manacus*)



Azulejo común
(*Thaupis episcopus*)



Sirirí común
(*Tyrannus melancholicus*)

Especies como *Caracara plancus* (caracara), *Aratinga pertinax* (perico carisucio), *Megacops choliba* (currucutú común), *Tyrannus melancholicus* (atrapamoscas) y *Mimus gilvus* (sinsonte) son aves con amplio rango de distribución. Estas especies cuentan con la capacidad de soportar cambios en sus hábitats naturales, lo cual les permite dispersarse a gran distancia. Son capaces de apropiarse de nidos abandonados o en estructuras modificadas antrópicamente (figura 17).



Figura 17. Especies de aves observadas en el ASA.
Fuente: Elaboración propia



Sinsonte
(*Mimus gilvus*)



Currucutú común
(*Megacops choliba*)



Caracara
(*Caracara plancus*)

Tringa solitaria (andarrios solitario) y *Tyrannus savana* (sirirí tijereta) son especies migratorias típicas de la Orinoquia. Viajan de las zonas templadas del Norte y Sur de América durante el invierno para veranear en el trópico, aprovechando recursos alimenticios que garantizan la supervivencia de la especie. Sin embargo, es frecuente encontrarlas fuera de la época migratoria, ya que sus crías aún no han llegado a la madurez necesaria para enfrentar los procesos de migración (figura 18) (McNish, 2007).



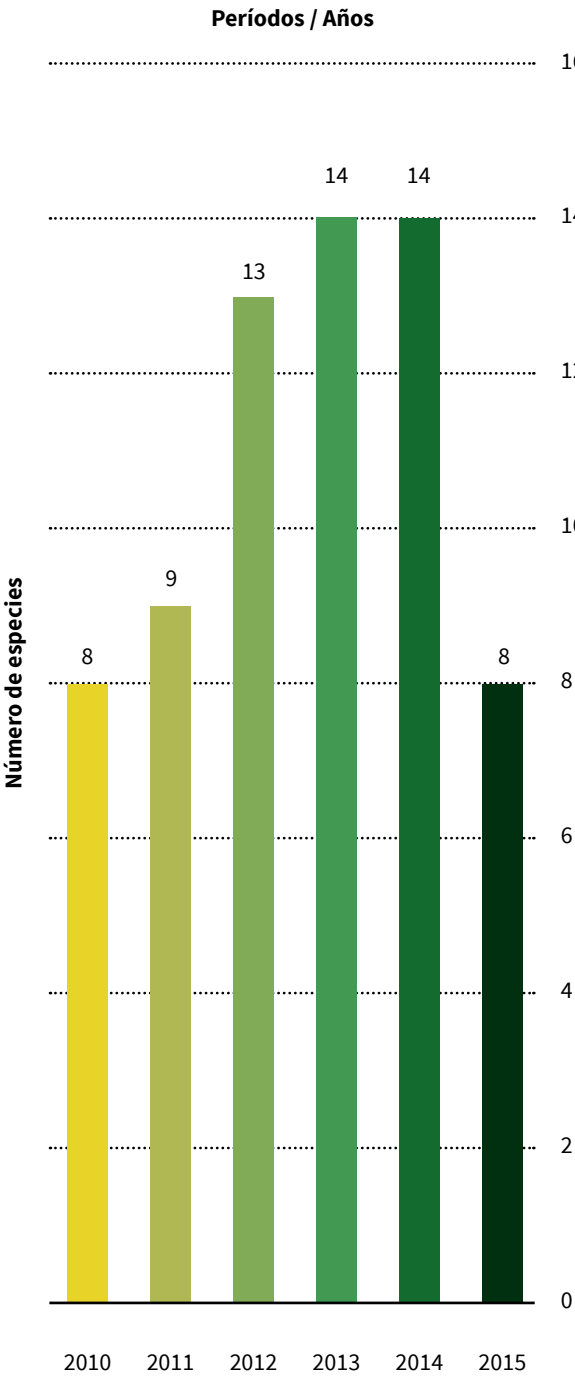
Figura 18. Especie migratoria observada en el ASA, andarrios solitario (*Tringa solitaria*).
Fuente: Elaboración propia

Mastofauna

Se observó un incremento en el registro de mamíferos en el área de influencia del ASA (figura 19). A partir del 2010 se observó un aumento sostenido en el número de especies que alcanzó su máximo en los años 2013 y 2014. Entre el 2014 y 2015, a pesar de que no hubo cambios significativos en la cobertura vegetal, se observó una disminución importante en el número de especies. Este descenso posiblemente es atribuible a factores exógenos al estudio como el clima.



Figura 19. Número de especies de mamíferos registradas en el ASA.
Fuente: Elaboración propia



Durante los recorridos realizados dentro de los bordes de los caños que limitan al ASA, en procesos de reforestación, se registraron madrigueras de cachicamos y semillas roídas por animales roedores o primates. Esto indica que, pese a la fragmentación, los bosques aún contaban con la capacidad para albergar y sostener especies de fauna en la zona.

Los mamíferos voladores correspondientes a los murciélagos (orden Chiroptera) fueron el grupo más representativo en el estudio, con el mayor número de especies registradas. Estas especies juegan un papel importante en los procesos ecológicos. Algunas de ellas pueden actuar como controladores naturales de plagas, insectos, roedores y de otras pequeñas especies. Otras especies actúan como agentes dispersores o polinizadores de especies vegetales. Es importante reconocer que este grupo contribuye con el mantenimiento y enriquecimiento de la diversidad florística de los ecosistemas (Medellín, Arita & Sánchez, 1997; Muñoz, 2001) (figura 20).



Figura 20. Murciélagos registrados en el ASA.
Fuente: Elaboración propia



Murciélago frugívoro grande
(*Artibeus lituratus*)



Murciélago flor de lis
(*Sturnira lilium*)

El establecimiento de las zonas de reforestación en el ASA, junto con los sistemas forestales, permitieron la conexión entre los corredores de los caños Danta y Bijao.

Especies como *Myrmecophaga tridactylade* (oso palmero), *Saimiri sciureus* (tití) y *Sciurus granatensis* (ardilla de cola roja) fueron registradas en las parcelas forestales del ASA, lo que sugiere que este cambio en el uso del suelo generó un sistema de corredor biológico natural en esta zona (figura 21).



Oso palmero
(*Myrmecophaga tridactylade*)



Ardilla coliroja
(*Sciurus granatensis*)



Mono ardilla
(*Saimiri sciureus*)

Efectos del uso de agua de producción tratada en la biodiversidad del ASA



Figura 21. Otras especies de mastofauna observadas en el ASA.
Fuente: Elaboración propia

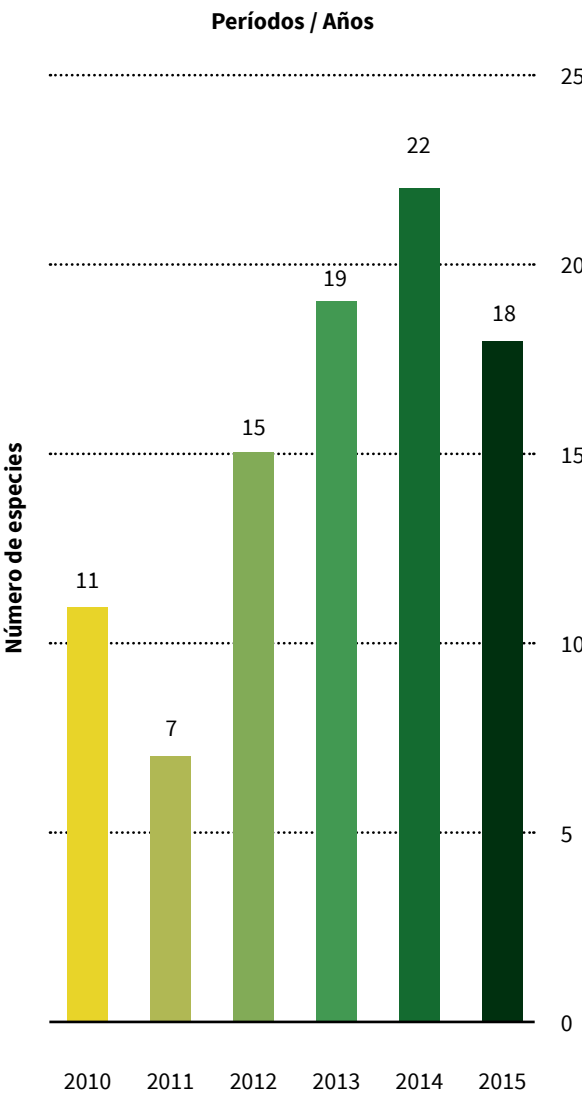
Herpetofauna

Este grupo taxonómico (anfibios y reptiles) presentó un incremento en el número de sus especies de 11 a 17 entre los años 2010 a 2015 respectivamente (figura 22).

El orden más representativo que se observó en el ASA fueron los anuros (sapos y ranas), grupo muy diverso que se encuentra en todos los continentes (excepto en la Antártida). Pueden habitar espacios acuáticos y terrestres, lo que les facilita la dispersión de sus especies (Vitt & Caldwell, 2009). Su importancia no solo se observa por las interacciones en los procesos ecológicos, sino por la vulnerabilidad ante los impactos antrópicos y las transformaciones de los ecosistemas que permiten realizar estudios para evaluar el estado de conservación de un determinado lugar (Acosta-Galvis, 2000).



Figura 22. Número de especies de anfibios y reptiles registrados en el ASA.
Fuente: Elaboración propia



Al generar espacios abiertos como la laguna de los Búfalos y la laguna de amortiguación en el ASA, se crearon microhábitats adecuados para estas especies que generaron un mayor crecimiento poblacional.

Especies como la *Dendropsophus mathiassoni* (rana sabanera), *Hypsiboas crepitans* (rana platanera o rana tigre) y *H. punctatus* (ranita verde de pecas rojas) son registradas como comunes en sistemas productivos del piedemonte llanero (Cáceres-Andrade & Urbina-Cardona, 2009). En el ASA se registraron las tres especies, siendo la *H. crepitans* la más común tanto en las parcelas forestales como en las zonas abiertas (figura 23).



Figura 23. Especies de anuros registrados en el ASA.
Fuente: Elaboración propia



Rana picuda
(*Leptodactylus fuscus*)



Ranita de estero
(*Dendropsophus mathiassoni*)



Rana pingüina
(*Elachistocleis ovalis*)

Finalmente, dentro del grupo de los reptiles el orden Squamata (serpientes, iguanas, lagartijas, babillas, entre otros) es uno de los más representativos y diversos que se observaron en el ASA (Vitt & Caldwell, 2009). *Podocnemis* cf. *vogli* se encontró en las zonas reforestadas. El aumento en el número de individuos de anfibios permitió el desarrollo de serpientes cazadoras como *Liophis lineatus* y *Chironius carinatus* observadas dentro de las parcelas forestales (figura 24).

La especie *Rhinella marina* (sapo común) presenta una amplia distribución en Colombia (figura 25). Sus cualidades físicas y fisiológicas le permiten tolerar sitios alterados. Su piel gruesa lo protege

de la pérdida de agua y la exudación de toxinas por su piel lo aleja de animales predadores (Cáceres-Andrade & Urbina-Cardona, 2009).

Los tres grupos taxonómicos caracterizados: aves, mamíferos y reptiles registraron un aumento de especies durante los periodos evaluados (2010 a 2015). Los diferentes espacios generados antrópicamente permitieron que el ASA se convirtiera en un espacio de refugio para la fauna silvestre de la zona. Con el aumento de la diversidad de fauna el proyecto ASA está contribuyendo al restablecimiento de procesos ecológicos tales como la dispersión de semillas, la polinización, el control biológico y el establecimiento de corredores biológicos, entre otros.

Efectos del uso de agua de producción tratada en la biodiversidad del ASA



Figura 24. Especies de reptiles registradas en el ASA.
Fuente: Elaboración propia



Lomo de machete
(*Chironius carinatus*)



Guarda caminos
(*Liophis lineatus*)



Galápagos llanero
(*Podocnemis* cf. *vogli*)



Figura 25. Especie de anuro *Rhinella marina* registrada en el ASA.
Fuente: Elaboración propia

05

Efectos del uso de agua de producción tratada en sistemas pecuarios





Metodología

Ensayos en ganado bovino

Las investigaciones para ganado bovino se llevaron a cabo en el ASA y el Centro de Investigación La Libertad. Los ensayos se desarrollaron entre los años 2011 y 2015.

Para el caso del estudio en ganado, se seleccionaron 48 vacas F1 del sistema doble propósito distribuidas en dos sitios (ASA y La Libertad) con 24 animales cada uno. A su vez, se evaluaron 4 grupos por sitio con 6 animales en cada caso.

Los animales tomaron el agua de producción tratada en cuatro proporciones diferentes de acuerdo con el arreglo experimental:

- 1 100 % únicamente consumieron agua de producción tratada.
- 2 50 % de agua de producción tratada y 50 % de agua de pozo profundo.
- 3 25 % de agua de producción tratada y 75 % agua de pozo profundo o control.
- 4 0 % de agua de producción tratada, solamente agua de pozo profundo.

Se analizaron las variables: peso del ternero al nacimiento, ganancia de peso al destete y peso al destete ajustado (kg) a los 210 días y producción total de leche con apoyo del ternero.

Ensayos en aves

En el caso de aves, se seleccionaron 200 animales de un día de nacidos pertenecientes a la línea Lohmann Brown. Las aves consumieron aguas de producción tratadas del Campo Castilla. Se aplicaron los siguientes tratamientos: agua control (proveniente de pozo profundo), mezclas de agua de pozo con 25% y 50% de agua de producción tratada, y 100% de agua de producción tratada.



La evaluación se llevó a cabo hasta la semana 55 de edad con 385 días de seguimiento, incluyendo las siguientes variables: peso del ave, ganancia de peso acumulada y número de huevos por día.

Adicionalmente, se realizaron evaluaciones macroscópicas y microscópicas *post mortem* de diferentes tejidos tanto para bovinos como aves.



Resultados

Bovinos

Para el caso del sistema de producción de ganado bovino doble propósito, los resultados de crecimiento y desarrollo se presentan para los dos sitios estudiados (ASA y CI La Libertad) en la tabla 13.

La respuesta derivada para las tres variables evaluadas indica que no se observó efecto en el crecimiento al destete por el consumo de las diferentes mezclas de agua suministradas. Con relación a las localidades ASA y La Libertad, específicamente en cuanto al peso del ternero al nacimiento y la ganancia de peso al destete, la respuesta de los animales fue similar.

El promedio general de peso de los terneros al nacimiento en el ASA fue de 29,32 kg, con una variación de $\pm 0,51$ kg y en La Libertad fue 29,99 kg, con una

variación de $\pm 0,33$ kg. Los tratamientos presentaron medias estadísticamente similares y la diferencia entre estos no fue mayor de 1 kg. Por su parte, la ganancia de peso al destete en terneros se obtuvo descontando el peso al nacimiento del peso al destete y dividiendo por los días de edad al destete:

Ganancia peso (kg.día⁻¹) =
$$\frac{\text{(Peso destete kg - Peso al nacimiento kg)}}{\text{Edad al destete en días}}$$

La ganancia de peso promedio al destete de los terneros ubicados en el ASA fue de 0,722 kg.día⁻¹, con una variación de $\pm 0,018$ kg.día⁻¹ entre los diferentes grupos de animales asociados a la proporción de agua de producción tratada. La ganancia de peso para los diferentes grupos de animales fluctuó entre 0,664 kg.día⁻¹, con una variación de $\pm 0,044$, y 0,799 kg.día⁻¹, con una variación de $\pm 0,040$, sin encontrar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados respecto al consumo de agua de producción tratada.

De igual forma, en el sitio La Libertad la ganancia de peso promedio al destete de los terneros fue de 0,652 kg.día⁻¹, con una variación de $\pm 0,014$ kg.día⁻¹, sin diferencias significativas entre los grupos de animales.

En ambos sitios el parámetro de ganancia de peso en los terneros no evidenció efecto por el consumo de agua de producción tratada, en diferentes proporciones. En cuanto al peso del ternero ajustado a los 210 días de edad, se analizó esta variable por la dispersión de los animales en alcanzar el destete. El promedio de días al destete fue de 255. Para dar uniformidad a la variable, se realizó el ajuste a una edad común en todos los animales por medio de la siguiente relación:

$$\left(\frac{\text{Peso al destete kg - Peso al nacimiento kg}}{\text{Edad al destete en días}} \right) \times 210 \text{ días} + \text{Peso nacimiento kg}$$

Efectos del uso de agua de producción tratada en sistemas pecuarios

ASA

CI La Libertad

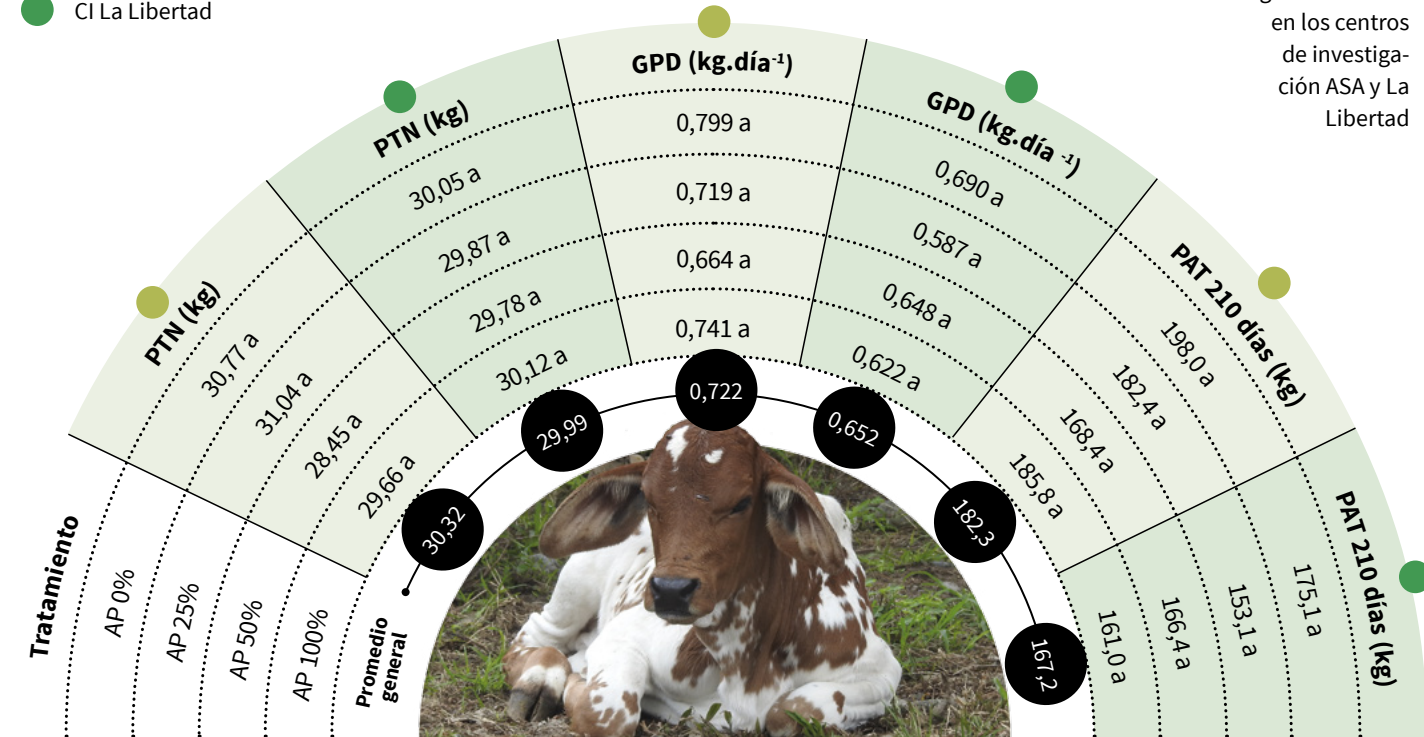


Tabla 13. Crecimiento de ganado bovino en los centros de investigación ASA y La Libertad

AP: agua de producción tratada 0-25-50-100 %: mezcla de agua consumida por los animales en estudio. PTN: peso ternero al nacimiento; GPD: ganancia de peso al destete; PAT: peso ajustado del ternero a los 210 días. Letras diferentes dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

La media general del peso ajustado al destete a los 210 días en el ASA fue de 182,3 kg. Este valor está por encima del promedio regional para el sistema de producción doble propósito. No se presentaron diferencias significativas entre los grupos de animales evaluados. Por lo tanto, el consumo de diferentes proporciones de agua de producción tratada no evidenció efecto en la ganancia de peso de los terneros a los 210 días de edad.

De otro lado, en el sitio La Libertad el peso promedio al destete de los terneros, ajustado a los 210 días, fue de 167,2 kg, con una variación de $\pm 2,87$ kg. En los diferentes grupos de animales esta variable fluctuó entre 161 kg, con una variación de $\pm 6,08$ kg, y 175,1 kg con una variación de $\pm 6,42$ kg, sin que las medias de los tratamientos evaluados fueran estadísticamente diferentes. Se evidencia de esta forma que, respecto a la ganancia de peso de los terneros, no se observó efecto en los animales por el consumo de agua de producción tratada en diferentes proporciones.

Producción de leche

Dado que el sistema de producción de ganadería que predomina en la región del piedemonte llanero es el de doble propósito, se evaluaron variables relacionadas con la producción de leche en animales que consumieron diferentes mezclas de agua de producción tratada y agua de pozo profundo en los dos sitios (ASA y La Libertad).

Se evaluaron 225 lactancias de 90 vacas experimentales, de las cuales 47 (52 %) fueron introducidas y 43 (48 %) nacieron durante el experimento. Los resultados de las variables evaluadas se muestran en la tabla 14.

Los resultados para PLO y para LRCT presentan algunas diferencias estadísticas entre tratamientos evaluados. Sin embargo, no se observa una tendencia clara en función a la proporcionalidad de la mezcla ingerida de agua tratada en los animales.

Al analizar los valores referenciales de otras investigaciones relacionadas con la producción de leche en sistemas doble propósito, la producción promedio general al día en los dos sitios (ASA y La Libertad) fue de 3,41 kg.día⁻¹ y 2,77 kg.día⁻¹ respectivamente. Estos resultados son similares a los reportados para el sistema doble propósito en la región (Federación Colombiana de Ganaderos [Fedegán], 2010).

Finalmente, la producción total de leche por animal al día se cuantificó a partir de la sumatoria de PLO y LRCT. Los resultados evidencian que en La Libertad la mayor cantidad de leche producida se obtuvo en los animales que consumieron agua de pozo profundo, y la menor se observó en los que consumieron agua de la mezcla 25%. En el ASA, por otra parte, el mayor valor se obtuvo en los animales que consumieron agua con el 25% de agua de producción tratada, y el menor en los del tratamiento de 50%. A pesar de la diferencia entre grupos en cada sitio, la respuesta de LTV, al igual que la de PLO y LRCT, no muestra un

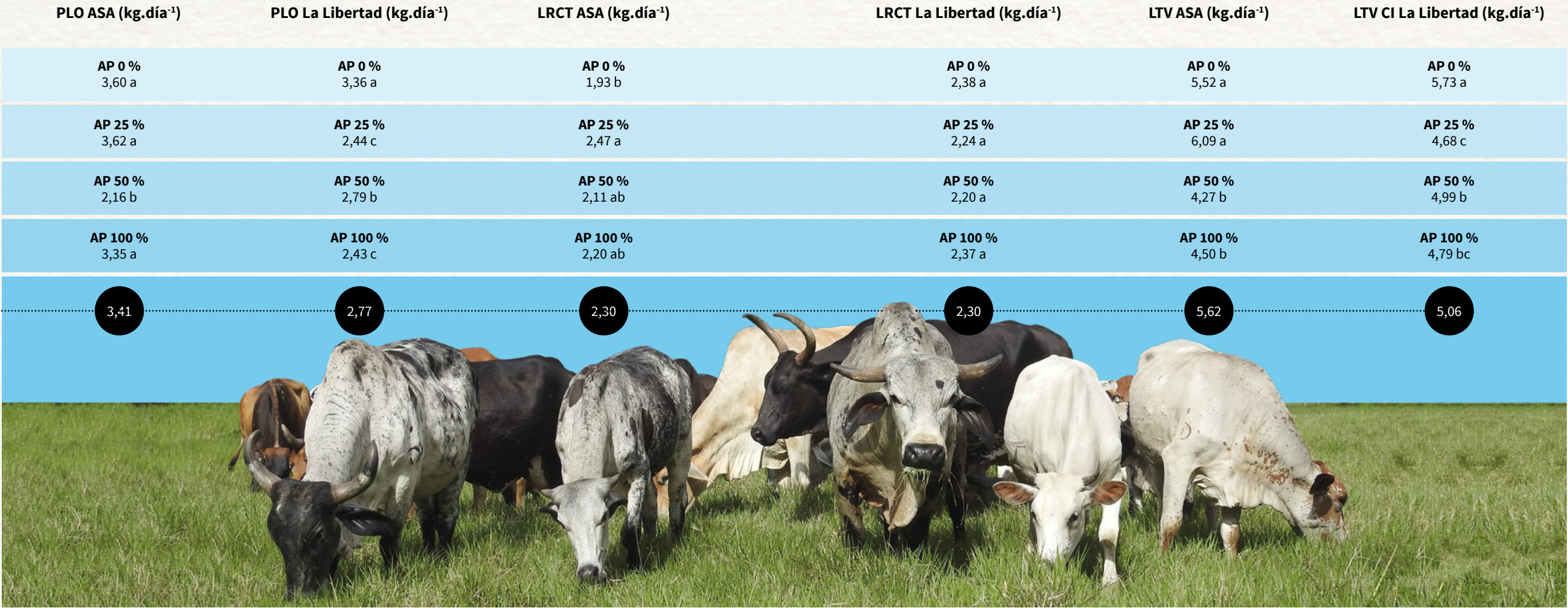
comportamiento que se asocie al consumo de las diferentes mezclas de agua evaluadas. Además, si se considera la comparación entre el promedio de producción total de leche obtenido de los bovinos en estudio (figura 26) por vaca al día en el ASA (5,62 kg.día⁻¹) y en La Libertad (5,06 kg.día⁻¹) con la producción promedio de la región (Fedegán, 2010), no se evidencia disminución en su potencial productivo por el consumo de agua de producción tratada.

Evaluación macro y microscópica en bovinos

En la evaluación macroscópica de los órganos de los bovinos que consumieron agua de producción tratada, examinados *post mortem*, no se evidenciaron cambios patológicos. De igual forma la evaluación microscópica no arrojó información que definiera situaciones que afectaran la salud por efecto del consumo de aguas de producción tratadas.



Tabla 14.
Producción de
leche en el ASA y
en el CI
La Libertad.
Fuente:
Elaboración
propia



AP: agua de producción; 0-25-50-100 %: mezcla de agua consumida por los animales en estudio. PLO: producción leche ordeño día; LRCT: leche residual consumida por el ternero; LTV: leche total vaca día. Letras diferentes dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p<0,05).



Figura 26.
Bovinos del
sistema doble
propósito.
Fuente:
Elaboración
propia



Tabla 15.
Producción de aves sometidas a consumo diferenciado de aguas de producción tratadas.
Fuente:
Elaboración propia

Peso del ave (g)		Ganancia peso acumulado (g)		Huevos/ave/día (%)	
					
AP 100%	1196,4 b	AP 100%	1235,0 b	AP 100%	70,7
AP 50%	1230,2 a	AP 50%	1270,5 a	AP 50%	73,6
AP 25%	1238,2 a	AP 25%	1278,9 a	AP 25%	72,9
AP 0%	1240,1 a	AP 0%	1281,2 a	AP 0%	75,1

AP: agua de producción tratada 0-25-50-100 %: proporción de agua consumida por los animales en estudio. Letras diferentes dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Dunnet (p<0,05).



Conclusiones

Los resultados obtenidos durante cinco años de investigación demuestran que el uso para irrigación del agua de producción tratada en sistemas agropecuarios no tuvo efectos perjudiciales sobre las propiedades del suelo y el desarrollo de los sistemas agrícola y forestal.

Las investigaciones en el componente pecuario, con relación al consumo de aguas de producción tratadas, no mostraron efectos sobre el desarrollo de los animales domésticos estudiados.

Las aguas de producción, una vez tratadas de acuerdo con los estándares definidos por las normas colombianas, podrían ser utilizadas como agua de riego en sistemas agropecuarios.

Los autores

Édgar Fernando Almansa Manrique
ealmansa@agrosavia.co

Ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, experto en manejo y conservación de suelos y aguas. Ha participado en proyectos con Pacific Rubiales, Banco Mundial, MADR y Colciencias, entre otros. Se desempeñó como director de laboratorio de suelos del CI La Libertad y fue coordinador nacional del proyecto de pequeña irrigación. En la actualidad es investigador de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), donde lidera como investigador principal de proyectos del convenio Agrosavia-Ecopetrol.

José Guillermo Velásquez Penagos
jvelasquez@agrosavia.co

Médico veterinario con maestría en reproducción bovina, suficiencia investigadora en estudios avanzados de fisiología animal y doctorado en ciencias biomédicas con énfasis en reproducción. En la actualidad trabaja en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) como investigador PhD en el campo de la ecofisiología y biotecnología de la reproducción, donde lidera como investigador principal delegado los macroproyectos de investigación del convenio Agrosavia-Ecopetrol y de doble propósito del piedemonte llanero. Es director nacional del grupo de investigación Reproducción Tropical y ha participado en proyectos con British Petroleum, Petrominerales, Colciencias, MADR y la Comunidad Europea, entre otros.

Sonia Lucía Gutiérrez Parrado
slgutierrez@agrosavia.co

Médica veterinaria y zootecnista de la Universidad de los Llanos. Actualmente se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), en donde realiza actividades dentro de proyectos del convenio entre Agrosavia-Ecopetrol y MADR

en biotecnología de la reproducción; específicamente, alrededor de temas de calidad seminal, procesos de criopreservación y producción de embriones. Participa en varios proyectos de reproducción de la agenda de investigación.

Gustavo Adolfo Rodríguez Yzquierdo
grodriguezy@agrosavia.co

Ingeniero agrónomo con maestría en ciencias del suelo y doctorado en ciencias agrícolas. Docente e investigador de fruticultura tropical. Profesor de pregrado y posgrado de la Universidad Central de Venezuela (UCV) en manejo agronómico de frutales. Actualmente se encuentra vinculado a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), en donde desarrolla estudios en ecofisiología de estrés, manejo eficiente del recurso hídrico, nutrición mineral, producción integrada de cultivos frutales tropicales y modelos de agronegocios sostenibles en diferentes sistemas productivos.

Ramón Guillermo González Rodríguez
rggonzalez@agrosavia.co

Médico veterinario zootecnista de la Universidad de los Llanos. Ha estado vinculado a la Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria (Agrosavia) desde el año 1994, desarrollando actividades de investigación en ecofisiología animal, manejo técnico científico de recursos genéticos y forrajes. En la actualidad se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en varios proyectos.

Julián Andrés Peláez Montoya
jpelaez@agrosavia.co

Licenciado en producción agropecuaria de la Universidad de los Llanos. En la actualidad se desempeña como profesional de transferencia de tecnología en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia).

Referencias

Acosta-Galvis, A. R. (2000). Ranas, salamandras y caecilias (Tetrapoda: Amphibia) de Colombia. *Biota colombiana*, 1 (3), 289-319. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/491/49110303.pdf>

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2014). Resúmenes de Salud Pública - Hidrocarburos totales de petróleo [*Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)*]. Recuperado de http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs123.html.

Almansa-Manrique, E. F., Velásquez-Penagos, J. G., & Rodríguez-Yzquierdo, G. A. (2018). Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 19(2), 403-420.

Amézquita, E., Thomas, R. J., Rao, I. M., Molina, D. L., & Hoyos, P. (2004). Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(2004), 269-277.

Bonza, P. N. (2014). *Evaluación del componente forestal Acacia mangium Willd, Gmelina arborea Roxby Anadenanthera peregrina (L.) Speg bajo sistemas silvopastoriles en el Centro de Investigación La libertad Corpoica-Villavicencio-Meta* (tesis de maestría). Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A., Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/240/1/203765.pdf>.

Cáceres-Andrade S. P., & Urbina-Cardona J. N. (2009). Ensamblaje de anuros de sistemas productivos y bosques en el piedemonte llanero, departamento del Meta, Colombia. *Caldasia*, 31(1): 175-194.

Canadian Council of Ministers of the Environment. (2007). *Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health*. Recuperado de <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/download/en/342/>.

Federación Colombiana de Ganaderos (Fedegán) (2010). Plan Estratégico de la Ganadería Colombiana. Recuperado de <https://www.fedegan.org.co/plan-estrategico-de-la-ganaderia-colombiana-2019>.

Flores, S. H. (1963). *Crecimiento en diámetro y altura del árbol del hule (Hevea brasiliensis Muell. Arg). en dos zonas ecológicas de Costa Rica* (tesis de maestría). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas y Centro Tropical de Investigación y Enseñanza para Graduados, Turrialba, Costa Rica.

Foster M. (2012). Standard Techniques for Inventory and Monitoring. En R. W. McDiarmid, M. Foster, C. Guyer, J. W. Gibbons, & N. Chernoff, *Reptile Biodiversity. Standard Methods for Inventory and Monitoring* (pp. 205-272). Londres, Reino Unido: University of California Press

Google Earth. (s.f.a). Mapa. Recuperado de <https://earth.google.com/web/@3.89102984,-73.5891676,364.32585778a,1030.07175749d,35y,358.60320961h,0t,0r>.

Google Earth. (s.f.b). AGROSAVIA Centro de Investigación La Libertad. Recuperado de <https://earth.google.com/web/@4.05829462,-73.46510276,335.5992105a,1061.00365449d,35y,0.00000001h,45.00004721t,0r/data=ChYaFAoML2cvMWhkemlycDkyGAIgASgC>.

Hilty, S. L., & Brown W. L. (2009). *Guía de las aves de Colombia*. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ornitología (ACO).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2004). *El Meta: un territorio de oportunidades*. Bogotá, Colombia: IGAC.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Bogotá, Colombia: IGAC.

Jamioy D. (2011). *Propuesta de indicadores de calidad edafológicos para valorar la influencia de los sistemas productivos sobre algunas propiedades físicas y químicas en suelos oxisoles del piedemonte llanero colombiano* (tesis de maestría). Universidad Nacional, Palmira, Colombia.

Jamioy, D. D., Menivar, J. C., & Rubiano, Y (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 64(4) 302-307.

Kattan H. G., Serrano V. H., & Aparicio, G. (1996). Aves de Escalete: Diversidad, Estructura Trófica y Organización Social. *Cespedesia*, 21(68), 920.

McNish, T. (2007). *Las aves de los Llanos de la Orinoquía*. Bogotá, Colombia: M&B Producciones y Servicios Ltda.

Medellín, R. A., Arita, H., & Sánchez, O. (1997). *Identificación de los murciélagos de México. Clave de campo*. Ciudad de México: Asociación Mexicana de Mastozoología.

Ministerio de Agricultura. (26 de junio de 1984). *Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos* [Decreto 1594 de 1984]. DO: 36.700.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (13 de agosto de 2014). Por la cual se adoptan

disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. [Resolución 1207 de 2014]. DO: 49242. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf.

Montenegro, H. (2003) Propiedades físicas de los suelos en relación con la fertilidad. En: M. Triana, R. Lara, Gómez, M. I., & G. Peñaloza, *Manejo integral de la fertilidad del suelo*. Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo.

Muñoz J. (2001). *Los murciélagos de Colombia. Sistemática, distribución, descripción, historia natural y ecología*. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.

Rioja, A. E. (2002). *Apuntes de fitotecnica general*. Ciudad Real, España: Universidad Castilla La Mancha.

Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O. & Arguedas, M. (2004). *Manual para productores de melina (Gmelina arborea) en Costa Rica*. Recuperado de http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Especies_plantaciones/MELINA/Manual%20para%20los%20productores%20de%20melina.pdf.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMAR-NAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación*. Recuperado de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6646/1/nom-138-semarnat.ssa1-2012.pdf>.

Van Bavel, C. H. M. (1949). Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America*, 14, 20-23

Villarreal H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., ... Umaña, A. M. (2006). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad* (2.a ed.). Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.

Vitt L, & Caldwell J. (2009). *Herpetology. An Introductory Biology for Anphibians and Reptiles*. Boston, EE. UU.: Elsevier.





Las aguas residuales pueden usarse para la producción agrícola mediante el riego, pero hacerlo requiere de investigación y gestión diligente de los riesgos sanitarios a través de un tratamiento adecuado o un uso apropiado. Con tal premisa en mente, en esta publicación se presentan en forma resumida algunas de las experiencias realizadas dentro del marco del convenio entre Agrosavia y Ecopetrol que tiene como objetivo “aunar esfuerzos técnicos, científicos, operativos y financieros para el desarrollo de la investigación sobre el uso y manejo integral de las aguas asociadas a la producción de hidrocarburos en sistemas agropecuarios del área de influencia de Ecopetrol”.

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria

