

Opinión

Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias

Effect of the use of production water of petroleum industry in agricultural and livestock activities

Édgar Fernando Almansa-Manrique,¹ José Guillermo Velásquez-Penagos,²
Gustavo Adolfo Rodríguez-Yzquierdo^{3*}

¹ Profesional de investigación, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica),
CI La Libertad. Villavicencio, Colombia. Correo: ealmansa@corpoica.org.co

² Investigador PhD, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica),
CI La Libertad. Villavicencio, Colombia. Correo: jvelasquez@corpoica.org.co

³ Investigador máster, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica),
CI Tibaitatá. Mosquera, Colombia. Correo: grodriguez@corpoica.org.co

Para citar este artículo: 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.

DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num2_art:1016



Esta licencia permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de la obra de modo no comercial, siempre y cuando se dé el crédito y se licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

* Autor de correspondencia. Centro de Investigación Tibaitatá, km 14 vía Mosquera-Bogotá.

Resumen

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, que equivalen al 0,00336% de la oferta total de agua en Colombia. Todo ese consumo está formalizado mediante concesiones otorgadas por autoridades ambientales. Por otra parte, el petróleo que se extrae de la tierra sale mezclado con aguas conocidas como aguas de producción, que hacen parte de los fluidos naturales de los reservorios. 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; ser tratadas y vertidas a cuerpos de aguas superficiales o al suelo, o ser reinyectadas en los yacimientos, como estrategia de disposición final. Las aguas de producción de los yacimientos de la Orinoquia tienen un contenido relativamente bajo de sales y sólidos disueltos, y no poseen elementos radioactivos. Esta condición permite que, una vez que sean tratadas, puedan reusarse en actividades productivas, en predios rurales que se encuentren en el área de influencia de los proyectos petroleros. Por estas razones, la Corporación Colombiana de

Investigación Agropecuaria (Corpoica) desarrolló una serie de trabajos de investigación, dirigidos a evaluar opciones de utilización de estas aguas de producción tratadas, para la irrigación de cultivos y pastos, así como el consumo de ganado y aves de corral. Se determinó el efecto de la aplicación de aguas de producción tratadas en diferentes componentes del ecosistema y en sistemas de producción agrícola y pecuario. El estudio se desarrolló en el departamento del Meta, en el predio denominado Área Sostenible Agroenergética (ASA) (03°53'06" N y 73°35'04" O) y en el Centro de Investigación La Libertad (04°03'32" N y 73°27'59" O), ubicados en los municipios de Acacías y Villavicencio, respectivamente. El agua de producción tratada que se utilizó provenía de los campos de Castilla y Apiay. Se seleccionó un conjunto de variables de suelos, agua, cultivos y animales, que fueron monitoreadas y analizadas entre los años 2011 y 2015. Los resultados de esta investigación indican que la utilización de estas aguas y su aplicación al suelo no presentaron efectos significativos en las propiedades físicas y químicas del suelo. Tampoco se evidenciaron consecuencias significativas en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, ni en la salud de animales y cultivos.

Palabras clave: aguas de producción, hidrocarburos, riego, sistema agrícola y pecuario

Abstract

The total supply of available water in the country is 2.01 billion m³. From this flow, the petroleum industry has obtained permits from environmental authorities for a total of 67.5 million m³. This is equivalent to 0.00336 % of the total flow. On the other hand, the oil that is extracted from the earth is mixed with waters that are known as "production waters". These waters are part of the natural fluids of the reservoirs. In Colombia, for every barrel of oil, an average of 13 barrels of water are produced. The "production waters" can be treated and reinjected in the same formation to maintain the pressure of the deposits to increase the "recovery factor", they can also be treated and discharged to bodies of surface water or to the soil surface; or reinjected into the reservoirs as final disposal strategies. The "production waters" of the Orinoquia deposits, have a relatively low content of salts and dissolved solids, and do not have radioactive elements. These conditions generate opportunities: once those waters are treated, they could be reused in productive activities in rural areas, within the area of influence of oil fields. For these reasons Corpoica developed

a series of research projects aimed at evaluating options for the safe use of these treated waters for the irrigation of pastures and as sources of water for cattle and poultry, among others. The effect of the application of treated production waters on different components of the ecosystem and on agricultural and livestock production systems was determined. The research was carried out in the department of Meta in the ASA Research Center (03°53'06" N and 73°35'04" W) and in the La Libertad Research Center (04°03'32" N and 73°27'59" W) located in Acacias and Villavicencio, respectively. The treated production water that was used came from the fields of Castilla and Apiay. A set of relevant variables of soil, water, crops and animals was selected. These variables were monitored and analyzed between the years 2011 and 2015. The results of this investigation indicate that the use of production waters and their application to the soil do not have significant effects on the physical and chemical properties of the soil. Neither do they have significant effects on the quality of the waters or on the health of animals and crops.

Keywords: agricultural and livestock system, hydrocarbons, irrigation, production waters

Introducción

Una vez tratadas, las aguas asociadas a la producción de los activos de Ecopetrol en los municipios de Acacías y Villavicencio cumplen con la normatividad ambiental vigente para su vertimiento a cuerpos de agua superficial. Sin embargo, no se contaba con evidencia científica sobre la posibilidad de utilizar estas aguas tratadas en otros sectores productivos, como el agrícola, el ganadero y el forestal.

En el año 2011, Ecopetrol firmó con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) un convenio de cooperación, con el fin de evaluar el efecto del uso de las aguas de producción tratadas en el suelo, así como en el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos forestales, ganado y algunas especies menores.

En el presente trabajo se destacan los resultados de la investigación respecto al impacto del uso de agua de producción tratada, proveniente de actividad petrolera en espacios controlados, en el desarrollo y la productividad de cultivos, así como evaluaciones y monitoreo de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y de calidad del agua. De igual forma, se refiere a aspectos del desarrollo, reproducción y productividad ganaderos y al desarrollo y productividad de aves de corral.

Materiales y métodos

Ubicación

La investigación se realizó en el predio denominado Área Sostenible Agroenergética (ASA), ubicado aproximadamente en el km 19 de la vía Acacías-San Carlos de Guaroa, Meta (Colombia). El paisaje se caracteriza por una altitud que oscila entre los 400 y los 1.000 m s. n. m., y representa un 12 % del total del área del departamento del Meta.

Su precipitación media anual es de cerca de 2.500 mm, presenta un periodo de lluvias entre abril y noviembre, y otro de marcada sequía de

diciembre a febrero. La temperatura promedio es mayor a 25 °C durante todo el año, y tiene una humedad relativa del 82 % en los meses lluviosos, y del 70 % en los secos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014).

En lo que a suelos se refiere, según la clasificación por vocación y uso del suelo, la zona pertenece a la subclase agrológica VI-s1, que se relaciona con actividades de ganadería semiintensiva, pastos de corte, producción de algunos frutales, así como sistemas de agroforestería y especies maderables (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2004). Inicialmente, la vegetación predominante estuvo representada por el pasto *Brachiaria* sp. En el ASA se realizaron estudios edáficos y pecuarios (ganado bovino y aves).

Adicionalmente, en el Centro de Investigación (CI) La Libertad de Corpoica (km 19 vía Villavicencio-Puerto López), ubicado también en el departamento del Meta, se trabajó en espacios controlados con cultivos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), y en sistemas de producción pecuarios (bovinos y peces).

Dicho centro está ubicado en el piedemonte llanero, a una altitud de 336 m s. n. m., con precipitaciones que promedian los 3.000 mm anuales, y temperaturas medias de 26 °C, con oscilaciones entre 23 y 30 °C. La humedad relativa varía del 70 % al 85 %, en la época seca y la lluviosa, respectivamente. Los suelos son de clase IV y de topografía plana, con texturas medias (franco-arcillo-arenoso), contenidos de materia orgánica entre el 2 % y el 3 % y un pH que va de moderado a fuertemente ácido (IGAC, 2004).

Investigación de suelo y cultivos en espacios controlados

Para el monitoreo del efecto de las aguas de producción tratadas en suelos y cultivos en condiciones controladas, se implementó la técnica de lisímetros plásticos con fondo (área superficial de 1 m²), que consistió en mantener un volumen de suelo conocido en cual se sembraron caña de azúcar (*S. officinarum*) y pasto

elefante (*P. purpureum*), con un suelo desnudo como control.

Periódicamente, se aplicó una dosis de agua hasta alcanzar la cosecha, en condiciones de manejo agronómico similares a las de los cultivos convencionales. Las aplicaciones de agua se calcularon en función del registro de consumo, de acuerdo con la etapa fenológica de cada especie, cuantificada mediante el uso de medidores edáficos de humedad.

Se realizaron dos riegos semanales, evaluando dos calidades de agua (agua de producción tratada de la estación de Ecopetrol de Apiay, y agua de pozo profundo del CI La Libertad) y dos dotaciones hídricas: una para mantener el suelo a capacidad de campo (100%) y otra con un suministro inferior (80% de tal capacidad). La calidad del agua de producción tratada y la de pozo profundo se presentan en la tabla 1.

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

Variable	Agua de producción de Apiay	Agua de pozo del CI La Libertad
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$)	1,220	38,5
Cloruros (mg/L)	215	< 3,3
Calcio (mg/L)	9,35	1,21
Magnesio (mg/L)	2,67	0,38
Sodio (mg/L)	104	1,58
Manganeso (mg/L)	0,22	< 0,079
Bario (mg/L)	1,04	< 0,096
Cadmio (mg/L)	< 0,01	< 0,01
Mercurio (mg/L)	< 0,002	< 0,001
Molibdeno (mg/L)	< 0,106	< 0,01
Arsénico (mg/L)	0,0005	0,0004
Relación de adsorción de sodio (RAS)	7,7	0,32
Hidrocarburos totales (mg/L)	0,74	< 0,67
Grasas y aceites (mg/L)	4,77	-
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	13,27	-

Nota: Promedio de cuatro años de registro, de 16 monitoreos trimestrales.

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la normatividad de uso de aguas residuales (Resolución 1207 de 2014 y Decreto 1594, artículos 40 y 41, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), que establece los criterios admisibles para la destinación del recurso agua en sistemas agrícolas y pecuario, se evidencia que las aguas de producción tratadas de Apiay cumplieron con todos los parámetros exigidos para uso agrícola y pecuario durante el periodo de evaluación.

Se realizaron tres ensayos en forma independiente (caña de azúcar, pasto y suelo sin cultivo). El diseño experimental fue completamente aleatorizado, con cuatro tratamientos (agua de pozo profundo y agua de producción tratada en dos niveles de humedad del suelo) y tres repeticiones, con un suelo de textura franco-areno-arcillosa (FAa).

En los cultivos se evaluó el rendimiento, expresado en materia verde generada por la planta (t/ha) durante 4 y 6 ciclos de corte, para caña de azúcar y pasto elefante, respectivamente. Los experimentos se mantuvieron durante cuatro años continuos. Además, se hizo un monitoreo semanal a cada tipo de agua, con el fin de determinar conductividad eléctrica, salinidad, pH y temperatura. En el ensayo de suelo sin cultivo, cada 6 meses se evaluaron las siguientes propiedades edáficas:

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

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó un análisis de varianza (Anova), de acuerdo con el diseño propuesto. De igual forma, se realizó una prueba de medias de Tukey con un 5 % de significancia ($\alpha = 0,05$), empleando el programa JMP® SAS, versión 8.1.

Investigación en el componente pecuario

Se desarrollaron investigaciones para ganado bovino y aves en el CI La Libertad y el predio ASA, de Corpoica. Los ensayos se realizaron entre los años 2011 y 2015.

En el caso del estudio en ganado, se seleccionaron 48 vacas F1 del sistema de doble propósito, distribuidas en dos localidades (ASA y CI La Libertad), con 24 animales en cada una. Se conformaron 4 grupos de 6 animales por localidad. Cada grupo de 24 animales se utilizó para evaluar los efectos del consumo de las aguas de producción. Las aguas tratadas del campo de Castilla fueron evaluadas en el ASA y las del campo de Apiay en el CI La Libertad.

Con un diseño de bloques al azar, se establecieron cuatro tratamientos: T1: 100 % de agua de producción tratada; T2: 50 % de agua de producción tratada y 50 % de pozo profundo; T3: 25 % de agua de producción tratada y 75 % de pozo profundo; T4: 100 % de agua de pozo profundo o control.

Las variables consideradas para la evaluación fueron: peso del ternero al nacer, ganancia de peso al inicio del destete y peso en el destete ajustado a 210 días. En cuanto a la producción de leche en el sistema de doble propósito, se evaluó la producción de leche total con apoyo del ternero. Adicionalmente, se realizaron evaluaciones macroscópicas y microscópicas *post mortem* de diferentes tejidos de bovinos.

En el caso de aves, se seleccionaron 200 animales de un día de nacidos, pertenecientes a la línea Lohmann Brown, que consumieron aguas de producción tratadas del campo de Castilla. Se aplicaron los siguientes tratamientos: agua control (proveniente de pozo profundo), y agua con 25 %, 50 % 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, número de huevos al día, peso del huevo, y tipificación del huevo, de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 1240 de 2012 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). De igual forma, se realizaron evaluaciones macroscópicas y microscópicas *post mortem* de tejidos de animales.

El diseño estadístico fue completamente aleatorizado con cuatro tratamientos y tres repeticiones, y se hicieron pruebas de medias de Tukey con $\alpha = 0,05$. En el caso de variables que no presentaron una distribución normal, se utilizó estadística no paramétrica, con apoyo de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y la no paramétrica de Kruskal-Wallis, para muestras independientes. La prueba de Dunnett se llevó a cabo para la comparación de medias con varianzas no homogéneas.

Resultados y discusión

Evaluaciones en suelos

En la tabla 2 se presentan los resultados de los efectos de los distintos tratamientos en las propiedades físicas

del suelo. En el caso de la densidad aparente, se encontraron diferencias significativas entre los suelos irrigados con aguas de producción tratadas y con aquellas de pozo profundo, independientemente del contenido de humedad del suelo evaluado.

Los valores de densidad aparente encontrados fueron inferiores a $1,46 \text{ mg/m}^3$, que Peña, Rubiano, Peña y Chaves (2009) reportaron como normales para suelos franco-arcillosos de la Orinoquia colombiana. Respecto a los mismos suelos, Almansa, Bernal y Arguello (2006) consideran que un valor de $1,3 \text{ mg/m}^3$ permite una adecuada aireación y movimiento del agua. Por lo señalado anteriormente, las aguas de producción tratadas no afectan de manera negativa este parámetro físico del suelo.

En lo que se refiere a la porosidad total, los valores registrados en el suelo no presentaron niveles críticos que indiquen alguna afectación por los tratamientos de riego utilizados. En tal sentido, Peña et al. (2009) señalan que los valores normales para suelos franco-arcillosos y franco-arenosos de la Orinoquia colombiana se encuentran alrededor del 45 % y el 40 %, respectivamente. En la presente investigación, los valores oscilaron entre el 47 % y el 52 %, lo cual indica una capacidad de aireación dentro de los rangos normales, independientemente del tipo de agua utilizada.

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo con diferentes tipos de agua y condiciones de humedad, regado permanentemente

Tratamiento	Densidad aparente (mg/m^3)	Porosidad total (%)	Estabilidad de agregados (mm)
E100	1,39 ^a	47,34 ^b	2,38 ^a
E80	1,39 ^a	47,36 ^b	1,84 ^b
N100	1,31 ^b	50,69 ^a	1,45 ^c
N80	1,26 ^b	52,08 ^a	1,48 ^c

E100: agua de producción tratada a capacidad de campo; E80: agua de producción tratada a un 80 % de capacidad de campo; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a un 80 % de capacidad de campo. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en la estabilidad de agregados se consideró el diámetro ponderado medio (DPM), y los resultados demuestran que las mejores condiciones al respecto se presentan en los tratamientos en los que se utilizaron aguas de producción tratadas. Esta variable se explica porque, a medida que se incrementa el DPM, la estabilidad de los agregados del suelo es mayor, lo que genera mejores condiciones estructurales del suelo y favorece el desarrollo de los cultivos. Adicionalmente, este efecto contribuye a disminuir el riesgo de degradación por procesos de sellado superficial y escorrentía.

En cuanto a su estabilidad, los agregados de los suelos que recibieron aguas de producción se clasifican como medianamente estables. De otra parte, los suelos regados con aguas de pozo profundo presentaron agregados ligeramente estables (Van Bavel, 1949). Los resultados indican un efecto positivo del uso de aguas de producción tratadas provenientes de la actividad petrolera en la estabilidad estructural del suelo cuando se usa de forma continua con fines de riego.

En la tabla 3 se muestran los datos encontrados en relación con las propiedades químicas del suelo estudiadas. Se obtuvieron diferencias estadística-

mente significativas en las variables evaluadas, luego de ser sometido a riego continuo con aguas de producción tratadas y de pozo profundo. En términos generales, con el uso de aguas de producción tratadas, se observaron una mayor concentración en los cationes determinados y un incremento del pH del suelo, lo cual conduce a mejores condiciones para el desarrollo de cultivos.

En el caso del calcio, sus valores aumentaron en los suelos en los que se aplicó agua de producción tratada. En tal sentido, Peña et al. (2009) señalan que alrededor de 1,5 cmol/kg son los resultados característicos de oxisoles de la Orinoquia colombiana. Así, los valores se encuentran en el rango normal en el caso de los tratamientos regados con agua de pozo profundo.

En estudios desarrollados por Jamioy (2011) y Jamioy, Menjivar y Rubiano (2015), se registró que en los suelos oxisoles del piedemonte llanero los contenidos de calcio oscilaron entre 0,35, en una pastura degradada, y 2,17 cmol/kg, en cultivos palma de aceite. Por lo anterior, los valores reportados en este estudio demuestran que los suelos regados con aguas de producción tratadas pueden aumentar favorablemente sus contenidos de calcio.

Tabla 3. Propiedades químicas del suelo con diferentes tipos de agua y condiciones de humedad, regados permanentemente en espacios controlados

Tratamiento	Ca (cmol/kg ⁻¹)	Mg (cmol/kg ⁻¹)	K (cmol/kg ⁻¹)	Na (cmol/kg ⁻¹)	CE (dS/m ⁻¹)	pH (2,5:1)	CIC (cmol/kg ⁻¹)
E100	3,31 ^a	0,66 ^a	0,27 ^a	1,88 ^a	0,48 ^a	6,66 ^a	3,23 ^a
E80	2,80 ^a	0,61 ^b	0,25 ^a	1,93 ^a	0,54 ^a	6,53 ^a	3,20 ^a
N100	1,91 ^b	0,52 ^c	0,09 ^b	0,12 ^b	0,09 ^b	5,29 ^b	2,56 ^b
N80	1,82 ^b	0,47 ^d	0,10 ^b	0,10 ^b	0,13 ^b	5,07 ^b	2,86 ^b

E100: agua de producción tratada a capacidad de campo; E80: agua de producción tratada a un 80 % de capacidad de campo; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a un 80 % de capacidad de campo; CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónico. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

Otro trabajo en suelos de la altillanura plana reporta valores de calcio de 0,44 en una pastura degradada, y de 1,76 cmol/kg en una mejorada (Bernal, Navas, & Hernández, 2014). Estos resultados son inferiores a los encontrados en este estudio, que indican que la utilización de aguas de producción tratadas como fuente de riego mejora los niveles de calcio en el suelo.

En lo que se respecta al magnesio (Mg), se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los riegos con agua de pozo profundo y aquellos con aguas de producción tratadas. Con estas últimas se observó un ligero incremento en el contenido de este elemento. Al comparar los resultados de este estudio con los de los trabajos de Jamioy (2011) y Bernal et al. (2014), se puede concluir que los suelos regados con agua de producción tratada aumentan los contenidos de este nutriente, alcanzando valores similares a los reportados por Jamioy (2011) y Bernal et al. (2014) en pasturas mejoradas: 0,54 y 0,63, respectivamente.

Con respecto al potasio (K), Andrades y Martínez (2014) señalan que suelos con valores inferiores a 0,12 cmol/kg tienen un bajo contenido de este elemento. Los resultados en los suelos estudiados demuestran que los regados con aguas de producción tratadas presentaron valores adecuados (0,25 a 0,27 cmol/kg), pero que aquellos que se regaron con agua de pozo profundo obtuvieron valores deficitarios. Cuando se compara lo observado en este estudio con los reportes de Jamioy (2011) y Bernal et al. (2014), se constata que el contenido de K es inferior al obtenido con aguas de producción tratadas.

En cuanto al sodio (Na), se observaron incrementos de su contenido en suelos a los que se les suministraron aguas de producción tratadas. Al comparar con los reportes de Jamioy (2011), quien registra valores de Na de 0,02 en pasto mulato y de 0,20 cmol/kg en cítricos, se puede indicar que los suelos regados con este tipo de aguas aumentaron su concentración de Na hasta 1,73 cmol/kg.

Al calcular el porcentaje de sodio intercambiable ($PSI = Na \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1} / CIC \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$), se obtiene un

valor de 0,58 % en el caso de los suelos regados con aguas de producción tratadas (E100). El aumento del Na no alcanza niveles que impliquen riesgos de sodicidad, ya que los suelos solo se consideran sódicos cuando alcanzan un valor de PSI mayor a 15 (Manzano, Rivera, Briones, & Zamora, 2014).

En relación con el valor de la conductividad eléctrica del suelo, en el caso de los riegos con aguas de producción tratadas se obtuvieron incrementos frente a los hechos con aguas provenientes de pozo profundo. No obstante, los registros alcanzados están dentro de la categoría de suelos normales (valores entre 0 y 2 dS/m) (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA], 2010).

Respecto al pH, con el uso de aguas de producción tratadas se observaron valores mayores, cercanos a la neutralidad, pero los suelos regados con aguas de pozo profundo mantuvieron su condición natural, con un pH ligeramente ácido. El efecto de las aguas tratadas en la acidez del suelo se considera positivo, en la medida en que favorece una mayor disponibilidad de nutrimentos, sobre todo fósforo.

Por su parte, la capacidad de intercambio catiónico encontrada en los suelos regados con aguas de producción tratadas fue superior a la de aquellos que se regaron con agua de pozo profundo. Esta capacidad hace referencia a la aptitud del suelo para retener nutrientes catiónicos (calcio, magnesio y potasio, principalmente). Los resultados permiten concluir que los suelos irrigados con agua de producción tratada presentan mejoras en la fertilidad y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Por otro lado, para la definición de los niveles permisibles de metales pesados en suelos, se utilizó la norma canadiense para la protección del medio ambiente y la protección humana (Canadian Council of Ministers of the Environment [CCME], 2006). Dicha normativa señala como límites permisibles los siguientes valores: cadmio (1,4 mg/kg), bario (760 mg/kg), cromo (64 mg/kg) y plomo (70 mg/kg).

Los resultados en lo que respecta al contenido de metales pesados en suelo, luego de haber sido regado continuamente con aguas de producción tratadas, se presentan en la tabla 4. En ellos se evidencia que los valores se encuentran por debajo de los límites exigidos en la normativa canadiense, lo cual indica que, al cumplir con la normatividad legal establecida, el uso de estas aguas con fines de riego no presenta riesgos de concentraciones elevadas de estos elementos, que puedan representar un problema ambiental.

Como se observa, solo hubo diferencias estadísticamente significativas entre las aguas y los contenidos de humedad edáfica evaluados en el caso del bario.

En tal sentido, las mayores concentraciones de este elemento se dieron en aguas de producción tratadas que mostraron valores de humedad del suelo a capacidad de campo, y ligeramente inferiores al 80 % de este contenido de humedad.

Por otra parte, los valores de este elemento fueron inferiores en los tratamientos con agua de pozo profundo. En el conjunto de los metales pesados evaluados, el bario fue el único que presentó un aumento con el uso de aguas de producción tratadas. Sin embargo, los contenidos encontrados se consideran seguros, y están muy lejos del límite crítico establecido en la normativa canadiense (760 mg/kg).

Tabla 4. Valores de concentración de metales pesados e hidrocarburos totales en suelo regado consecutivamente aguas de producción tratadas

Tratamiento	Cadmio (mg/kg ⁻¹)	Bario (mg/kg ⁻¹)	Cromo (mg/kg ⁻¹)	Plomo (mg/kg ⁻¹)	Hidrocarburos totales (%)
E100	0,05 ^a	53,79 ^a	22,83 ^a	5,42 ^a	< 0,00625 ^a
E80	0,05 ^a	33,48 ^{ab}	24,41 ^a	5,30 ^a	< 0,00625 ^a
N100	0,05 ^a	20,02 ^b	20,02 ^a	5,88 ^a	< 0,00625 ^a
N80	0,05 ^a	21,96 ^b	21,96 ^a	6,14 ^a	< 0,00625 ^a

E100: agua de producción tratada a capacidad de campo; E80: agua de producción tratada a un 80 % de capacidad de campo; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a un 80 % de capacidad de campo. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los hidrocarburos totales en suelo, los valores encontrados fueron inferiores al rango detectable (< 0,00625). Los resultados demuestran que no hay un efecto perjudicial relacionado con su contenido en suelos irrigados con aguas de producción tratadas, de acuerdo con lo determinado por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades del gobierno de los Estados Unidos de América (ATSDR, por sus siglas en inglés) (2014).

Evaluación en cultivos

En las tablas 5 y 6 se muestran los resultados de rendimiento de biomasa (materia fresca) durante varios ciclos continuos de producción de los cultivos de caña de azúcar y pasto elefante, respectivamente. Se realizaron evaluaciones de ambos cultivos con aguas provenientes de la actividad petrolera y de pozo profundo, con dos contenidos de humedad del suelo (100 % y 80 % de capacidad de campo).

Tabla 5. Materia fresca (t/ha) en el cultivo de caña de azúcar durante cuatro ciclos continuos de producción, con diferentes tipos de agua y condiciones de humedad, regado permanentemente

Tratamiento	Primer corte (290 días)	Segundo corte (537 días)	Tercer corte (846 días)	Cuarto corte (1132 días)
E100	135,74 ^a	120,61 ^a	158,54 ^a	86,12 ^a
E80	136,78 ^a	100,67 ^a	153,49 ^a	84,47 ^a
N100	146,20 ^b	95,59 ^a	96,36 ^b	56,46 ^a
N80	136,07 ^b	84,19 ^a	105,49 ^{ab}	59,42 ^a

E100: agua de producción tratada a capacidad de campo; E80: agua de producción tratada a un 80 % de capacidad de campo; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a un 80 % de capacidad de campo. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Valores de materia fresca (t/ha) en el cultivo de pasto elefante durante seis ciclos continuos de producción, con diferentes tipos de agua y condiciones de humedad, regado permanentemente

Tratamiento	Primer corte (101 días)	Segundo corte (205 días)	Tercer corte (309 días)	Cuarto corte (443 días)	Quinto corte (753 días)	Sexto corte (1064 días)
E100	81,67 ^a	112,73 ^a	94,47 ^a	71,87 ^a	74,53 ^a	93,31 ^a
E80	69,17 ^a	106,67 ^a	78,50 ^a	58,33 ^a	62,93 ^a	83,20 ^a
N100	79,50 ^b	98,00 ^a	93,73 ^a	70,73 ^a	72,47 ^a	88,18 ^a
N80	92,87 ^b	98,33 ^a	80,07 ^a	62,80 ^a	61,80 ^a	83,20 ^a

E100: agua de producción tratada a capacidad de campo; E80: agua de producción tratada a un 80 % de capacidad de campo; N100: agua de pozo profundo a capacidad de campo; N80: agua de pozo profundo a un 80 % de capacidad de campo. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

En Colombia, la cosecha de la variedad Cenicaña CC8592, utilizada en esta investigación, se presenta en promedio entre los 10 y los 14 meses en las condiciones del Valle del Cauca. Según el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (Cenicaña) (2010), el rendimiento medio de la variedad en las dos últimas décadas se encuentra entre 120 y 130 t/ha. En la tabla 6 se demuestra que los valores están

dentro del rango previsto para el material genético evaluado en buena parte de los primeros tres cortes.

De igual manera, no se observó un efecto desfavorable del uso de agua de producción tratada en el cultivo de caña de azúcar, y solo hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en el tercer ciclo de corte (tabla 5). No obstante,

los mayores rendimientos correspondieron al uso de riego de aguas tratadas, indistintamente del contenido de humedad del suelo. Por tal razón, se puede indicar que se presentaron efectos positivos por la utilización de aguas de producción tratadas en el rendimiento del cultivo durante los cuatro años de continuidad del estudio.

En el caso del pasto elefante, los resultados permiten afirmar que, durante los ciclos continuos de corte a partir del segundo año, no se observaron diferencias significativas entre los dos tipos de agua utilizados ni el contenido de humedad del suelo. Al ser comparados con lo descrito por Cardona, Ríos y Peña (2012), los valores medios de rendimiento de materia verde, presentados en la tabla 6, indican que se encuentran en el rango reportado por los autores (80-100 t/ha en cada corte), que está aproximada-

mente entre 250 y 300 t/ha de materia verde al año en el pasto elefante. En conclusión, el uso de aguas de producción tratadas no afectó de forma negativa el rendimiento y la producción del pasto elefante en las condiciones de experimentación.

Evaluación en ganado bovino

En el caso del sistema de producción de ganadería bovina de doble propósito, en animales que consumieron diferentes proporciones de aguas de producción tratadas se evaluaron las siguientes variables: peso del ternero en el nacimiento (kg), ganancia de peso en el destete (kg/día), y peso del ternero ajustado a los 210 días (kg). Para las dos localidades estudiadas (predio ASA y CI La Libertad), los resultados se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Peso de terneros en el nacimiento, ganancia de peso en el destete y peso ajustado a los 210 días, en las cohortes del predio ASA y el CI La Libertad

Tratamiento	PTN en ASA (kg)	PTN en CI La Libertad (kg)	GPD en ASA (kg/día)	GPD en CI La Libertad (kg/día)	PAT en ASA (kg)	PAT en CI La Libertad (kg)
AP 100 %	29,66 ^a	30,12 ^a	0,741 ^a	0,622 ^a	185,8 ^a	161,0 ^a
AP 50 %	28,45 ^a	29,78 ^a	0,664 ^a	0,648 ^a	168,4 ^a	166,4 ^a
AP 25 %	31,04 ^a	29,87 ^a	0,719 ^a	0,587 ^a	182,4 ^a	153,1 ^a
AP 0 %	30,77 ^a	30,05 ^a	0,799 ^a	0,690 ^a	198,0 ^a	175,1 ^a

AP: agua de producción tratada; %: proporción de agua consumida por los animales en estudio; PTN: peso en el nacimiento; GPD: ganancia de peso en el destete; PAT: peso ajustado a los 210 días. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las tres variables evaluadas demuestran que el consumo de diferentes proporciones de aguas de producción tratadas en las dos localidades en estudio no tuvo un efecto en los animales establecidos, en relación con la progenie de terneros, específicamente en cuanto a su peso en el nacimiento y la ganancia de peso en el destete.

El promedio general de peso de los terneros en el nacimiento en el predio ASA fue de $30,32 \pm 0,51$ kg, mientras que en el CI La Libertad fue de $29,99 \pm 0,33$ kg, resultados similares a los reportados por Chirinos y Farías (2012). Los tratamientos presentaron medias estadísticamente similares, y la diferencia entre estos no fue mayor a 1 kg. Por su parte, la

ganancia de peso en el destete se obtuvo descontando del peso en el destete aquel del nacimiento, y dividiendo el valor por los días de edad que tenía el ternero en el destete:

$$\text{Ganancia peso (kg/día)} = \frac{(\text{peso destete [kg]} - \text{peso nacimiento [kg]})}{\text{edad destete (días)}}$$

La ganancia de peso promedio de los terneros del ASA en el destete fue de $0,722 \pm 0,018$ kg/día. A su vez, con los tratamientos de aguas de producción, la ganancia fluctuó entre $0,664 \pm 0,044$ y $0,799 \pm 0,040$ kg/día, sin diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de consumo de agua de producción evaluados.

Estos valores fueron mayores a los reportados por Oviedo, Pastrana, Maza, Salgado y Vergara (2011), quienes obtuvieron ganancias de peso de terneros en el destete de $0,484$ kg/día en animales suplementados con melaza y semilla de algodón. Otros estudios, realizados por Guasde, Peña y Parra (2006), refieren ganancias de peso de $0,4289$ kg/día en el predestete.

De igual forma, en el CI La Libertad la ganancia promedio de peso del ternero en el destete fue de $0,652 \pm 0,014$ kg/día, sin diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. De esta manera, en ninguna de las dos localidades se evidenció un efecto de las aguas de producción en los parámetros de ganancia de peso en los terneros provenientes de animales que consumieron continuamente aguas tratadas.

La variable del peso del ternero ajustado a los 210 días de edad se analizó debido a la diversidad del tiempo que los animales tardan en alcanzar el destete. En este sentido, el promedio de días hasta el destete fue de 255; por tal razón, para dar uniformidad a la variable, en todos los animales se ajustó a una fecha común mediante la siguiente relación:

$$\left(\frac{(\text{Peso destete [kg]} - \text{peso nacimiento [kg]})}{\text{edad destete [días]}} \right) * 210 \text{ días} + \text{peso nacimiento (kg)}$$

En el ASA, la media general del peso ajustado al destete a los 210 días fue de $182,3$ kg, valor similar al encontrado por Ossa, Suárez y Pérez (2005), que fue de $182,7$ kg para un peso ajustado al destete a los 240 días, en terneros del sistema de producción de carne de la raza romosinuano.

Además, este valor está por encima del promedio del sistema de producción de doble propósito (Guasde et al., 2006; Oviedo et al., 2011). No se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, por lo cual el consumo de diversas proporciones de aguas de producción tratadas no afectó la ganancia de peso del ternero a los 210 días de edad.

Por otro lado, en el CI La Libertad el peso promedio general ajustado al destete a los 210 días fue de $167,2 \pm 2,87$ kg, valor superior a los encontrados por Guasde et al. (2006) y Oviedo et al. (2011). En los tratamientos de aguas de producción tratadas, esta variable fluctuó entre $161 \pm 6,08$ y $175 \pm 6,42$ kg, sin que las medias de los tratamientos evaluados fueran estadísticamente diferentes. Los resultados de consumo de aguas de producción tratadas de los campos de Castilla y Apiay de Ecopetrol no evidenciaron un efecto en las variables asociadas a la ganancia de peso de terneros.

Evaluación en producción de leche

Dado que el sistema de ganadería en la región es de doble propósito, se evaluaron variables concernientes a la producción de leche, con base en animales que consumieron diferentes proporciones de aguas de producción tratadas, provenientes de los campos Apiay y Castilla en dos localidades (predio ASA y CI La Libertad).

Las vacas ingresaron al experimento con una edad promedio de cuatro años, se evaluaron 225 lactancias de 90 vacas experimentales, de las cuales 47 (52%) fueron introducidas y 43 (48%) nacieron en las cohortes durante el estudio. Los resultados de las variables evaluadas se muestran en la tabla 8. Los valores de las diversas variables estudiadas presentan algunas diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados.

Tabla 8. Producción de leche (ordeño/día), leche residual consumida por el ternero y leche total (vaca/día), de las cohortes del predio ASA y el CI La Libertad

Tratamiento	PLO ASA (kg/día)	PLO CI La Libertad (kg/día)	LRCT ASA (kg/día)	LRCT CI La Libertad (kg/día)	LTV ASA (kg/día)	LTV CI La Libertad (kg/día)
AP 100 %	3,35 ^a	2,43 ^c	2,20 ^{ab}	2,37 ^a	4,50 ^b	4,79 ^{ab}
AP 50 %	2,16 ^b	2,79 ^b	2,11 ^{ab}	2,20 ^a	4,27 ^b	4,99 ^{ab}
AP 25 %	3,62 ^a	2,44 ^c	2,47 ^a	2,24 ^a	6,09 ^a	4,68 ^b
AP 0 %	3,60 ^a	3,36 ^a	1,93 ^b	2,38 ^a	5,52 ^{ab}	5,73 ^a

AP: agua de producción tratada; %: proporción de agua consumida por los animales en estudio; PLO: producción de leche (ordeño/día); LRCT: leche residual consumida por el ternero; LTV: leche total (vaca/día). Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, el comportamiento de respuesta no evidencia efectos del consumo de agua de producción en los parámetros de producción de leche estudiados, en ninguno de sus componentes. Además, en aquellos en los que se presentaron diferencias estadísticas, en los animales no se observó una tendencia clara en función de la proporcionalidad de la mezcla ingerida de agua de producción tratada.

Al analizar los valores referenciales en otras investigaciones de la producción de leche en sistemas de doble propósito, la producción promedio general de leche/día en la cohorte experimental del predio ASA y el CI La Libertad fue de 3,41 y 2,77 kg/día, respectivamente. Estos resultados son similares a los reportados para el sistema de doble propósito en la región (Federación Colombiana de Ganaderos [Fedegán], 2010).

En cuanto a la leche residual consumida por el ternero, se evaluó mediante la diferencia de su pesaje antes del amamantamiento residual luego del ordeño, y después de que el ternero dejó de mamar voluntariamente. En este caso, los valores de la localidad de ASA presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, los resultados

obtenidos en el testigo o control (agua de pozo profundo) fueron menores.

Al comparar los resultados con otras investigaciones, el promedio general de leche residual consumida por el ternero al día en el predio ASA y el CI La Libertad fue de 2,30 kg al día. Este valor es mayor al reportado por Roldán, Perdomo, Sánchez y Ramírez (2000), quienes obtuvieron una producción de leche residual de 1,8 kg al día en vacas de doble propósito, lo que refleja la competitividad del sistema productivo evaluado.

Finalmente, la producción total de leche (vaca/día) se cuantificó como la sumatoria de dos evaluaciones: la del ordeño y la indirecta, consumida por el ternero o residual. Los resultados demuestran que en ambas localidades la mayor cantidad de leche se produjo en el tratamiento control. Sin embargo, en ambas localidades este tratamiento no resultó ser significativamente diferente a otros, en los cuales había mezclas con aguas de producción. Por lo tanto, se puede concluir que en los estudios realizados no se observa un efecto asociado a los tratamientos en la producción de leche.

De igual forma, la producción de leche total (vaca/día) promedio en el predio ASA y el CI La Libertad fue de 5,62 y 5,06 kg, respectivamente. Al comparar estos resultados con la producción promedio de la región, de acuerdo con Fedegán (2010), no se evidencia disminución en el potencial productivo del sistema de doble propósito.

Evaluación macroscópica y microscópica en bovinos

La evaluación macroscópica de los órganos bovinos examinados *post mortem* no mostró ningún cambio de apariencia o daño respecto a los testigos, y su aspecto fue normal. De igual forma, la evaluación microscópica no arrojó información que demostrara situaciones que afectaran la salud por efecto del consumo de aguas de producción tratadas.

Evaluación en aves

En este sistema de producción se evaluaron 20 aves por cada tratamiento y se analizaron las siguientes variables: peso promedio por ave, ganancia de peso acumulada, número de huevos al día, porcentaje de postura al día, y peso y tipificación del huevo, de acuerdo con la norma Icontec.

Los resultados se presentan en la tabla 9 y, dado que los datos no se ajustaron a una distribución normal, se utilizaron procedimientos estadísticos no paramétricos, como la prueba de Kruskal-Wallis, para muestras independientes, y la de Dunnett, para la comparación de medias con varianzas no homogéneas.

Tabla 9. Valores de variables asociadas a la producción de aves sometidas a consumo diferenciado de aguas de producción

Tratamiento	Peso del ave (g)	Ganancia de peso acumulado (g)	Número de huevos al día	Peso del huevo (g)
AP 100 %	1196.4 ^b	1235.0 ^b	1.085 ^a	59.7 ^a
AP 50 %	1230.2 ^a	1270.5 ^a	1.155 ^a	59.3 ^a
AP 25 %	1238.2 ^a	1278.9 ^a	1.175 ^a	59.3 ^a
AP 0 %	1240.1 ^a	1281.2 ^a	1.125 ^a	60.3 ^a

AP: agua de producción tratada; %: proporción de agua consumida por los animales en estudio. Letras distintas dentro de la misma columna representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Dunnett ($\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia

En el caso de las variables de peso promedio por ave y ganancia de peso acumulada, se presentaron diferencias entre los tratamientos evaluados. Las aves que estuvieron expuestas a un 100% de consumo de aguas de producción tratadas tuvieron menor peso. Sin embargo, la diferencia fue muy pequeña: 46,2 g entre las aves con un consumo de agua tratada del 100% y aquellas con un 0%, lo cual corresponde a una diferencia en peso del 2%. Dado que esta diferencia está dentro del rango de dispersión para

estos tipos de variables y de aves, probablemente no es atribuible a los tratamientos aplicados.

En cuanto al número de huevos al día y su peso, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados. Los resultados encontrados no evidencian asociación entre la producción y el peso de los huevos y el consumo de aguas tratadas provenientes del campo Castilla.

Por otra parte, la Norma Técnica Colombiana 1240 del Icontec establece la categorización de los huevos según su peso en las siguientes clases: tipo jumbo: >78 g; tipo AAA: de 67,0 a 77,9 g; tipo AA: de 60,0 a 66,9 g; tipo A: de 53,0 a 59,9 g; B: de 46,0 a 52,9 g y tipo C: <46,0 g. Los resultados de esta variable en los tratamientos evaluados en 21.561 lecturas u observaciones se presentan en la tabla 10.

Los resultados demuestran que el mayor porcentaje de huevos con la máxima categoría (jumbo), se

encontraron en las aves en el tratamiento control; sin embargo, a pesar de su diferencia, el número de observaciones que se calificaron para esta categoría fue de 96 para los cuatro tratamientos, lo que representa solamente un 0,45 % del recuento realizado, lo cual no se considera determinante para definir un efecto considerable del tratamiento. Las categorías que más se presentaron en todas las observaciones fueron la A y AA, con 8.016 y 7.944 observaciones, respectivamente. En estas categorías, que son representativas, no se observan cambios entre tratamientos que se asocian al consumo del agua de producción.

Tabla 10. Valores de categorización de huevos provenientes de gallinas sometidas a distintas proporciones de consumo de aguas de producción

Tratamiento	Categoría C (%)	Categoría B (%)	Categoría A (%)	Categoría AA (%)	Categoría AAA (%)	Categoría jumbo (%)
AP 100 %	24,1	22,1	25,5	25,3	24,4	21,9
N.º de observaciones	(144)	(505)	(1896)	(2.056)	(746)	(29)
AP 50 %	25,7	27,4	26,5	24,3	23,6	25,0
N.º de observaciones	(174)	(651)	(1.951)	(1.945)	(598)	(22)
AP 25 %	27,4	28,5	24,3	24,5	23,2	22,9
N.º de observaciones	(163)	(627)	(2.121)	(1.930)	(610)	(24)
AP 0 %	22,7	22,1	23,7	25,9	28,9	30,2
N.º de observaciones	(153)	(505)	(2.048)	(2.013)	(629)	(21)
Total	634	2.288	8.016	7.944	2.583	96

AP: agua de producción tratada; %: proporción de agua consumida por los animales en estudio. Categorización de acuerdo con la normativa del Icontec 1240/2012.

Fuente: Elaboración propia

Evaluación macroscópica y microscópica en aves

La evaluación macroscópica de todas las aves examinadas *post mortem* indica que no se presentaron cambios significativos. Su aspecto fue normal, y no se observaron alteraciones que permitieran inferir ningún efecto de los tratamientos en la salud de las aves. De igual forma, la evaluación microscópica de los tejidos no arrojó información que indicara alguna asociación de alteraciones celulares o del tejido con el consumo de aguas de producción tratadas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos durante cinco años de investigación en los campos experimentales del predio Área Sostenible Agroenergética (ASA) y el Centro de Investigación La Libertad de Corpoica indican que, en las condiciones de los llanos orientales, las aguas de producción tratadas de los campos de Apiay y Castilla, que cumplen con la norma legal establecida, al ser utilizadas para riego no tuvieron efectos negativos en las propiedades físicas del suelo: densidad aparente, porosidad y estabilidad de agregados.

En cuanto a las propiedades químicas, el uso de estas aguas aumentó los contenidos de Ca, Mg, K y Na, así como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo. Adicionalmente, en los años de riego con estas aguas no se observó acumulación de metales pesados como cadmio, bario, cromo y plomo. De igual forma, durante todo el tiempo de evaluación, el contenido de hidrocarburos estuvo por debajo del rango detectable, y sin diferencias entre suelos regados con agua de pozo y con aguas de producción tratadas.

En lo que se refiere al desarrollo de cultivos, no se observó ningún efecto negativo por el uso de aguas de producción tratadas, y se registraron mejores índices de biomasa y crecimiento, en comparación

con los datos regionales de cultivos como caña de azúcar y pasto elefante.

Este trabajo también analizó el uso de estas aguas en la dieta de bovinos y aves. Los resultados del estudio no mostraron asociaciones que evidenciaran efectos del consumo de estas en el desarrollo y la producción de carne, leche y huevos, ni cambios *post mortem* observados a nivel macroscópico y microscópico de los tejidos que demostraran condiciones que afectaran la salud de bovinos y aves. Además, en el desarrollo de la investigación, en todos los casos, estas aguas cumplieron con las normas de uso para riego.

De este modo, Corpoica pone a disposición del país los resultados de la primera investigación acerca de los efectos del uso de aguas de producción tratadas provenientes del sector de hidrocarburos en el suelo, cultivos, bovinos y aves.

Agradecimientos

Se agradece al Convenio 5211320, 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. Fase II", por la financiación de los recursos para el desarrollo de la experimentación. Igualmente, se agradece Mónica Betancourt Vásquez, de Corpoica, por la revisión, estructuración y redacción de la versión integradora de este artículo de investigación.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Almansa, E. F., Bernal, J. H., & Argüello, O. (2006). *Indicadores físicos de sostenibilidad edáfica* (Plegable divulgativo N.º 48). Villavicencio, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), CI La Libertad.
- Andrades, M., & Martínez, M. E. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen* (3.ª ed). Logroño, España: Universidad de la Rioja.
- Bernal, J. H., Navas, G. E., & Hernández, R. S. (2014). Requerimientos y respuestas a la fertilización del maíz en suelos de sabanas ácidas de Colombia. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 15, 6-10.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2006). *A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines*. Recuperado de http://www.ccme.ca/publications/ceqg_rcqe.html?category_id=125.
- Cardona, E., Ríos, L., & Peña, J. (2012). Disponibilidad de variedades de pastos y forrajes como potenciales materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol en Colombia. *Información tecnológica*, 23(6), 87-96. doi:10.4067/S0718-07642012000600010.
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña). (2010). *Producción de caña de azúcar en el valle del río Cauca*. Cali, Colombia: Cenicaña.
- Chirinos, Z. & Faría, J. (2012). Efecto de la estrategia de cría sobre el peso al destete de los becerros y la productividad de vacas doble propósito. *Actas Iberoamericanas de Conservación Animal*, 2, 343-346.
- Federación Colombiana de Ganaderos (Fedegán). (2010). *Plan estratégico de la ganadería colombiana 2019* [documento en medio magnético]. Bogotá, Colombia: Fedegán.
- Guasde, M. J. C., Peña, R. E., & Parra, A. L. (2006). *Evaluación de la producción de leche de un hato bovino criollo doble propósito bajo dos sistemas de ordeño* (tesis de pregrado). Universidad Privada de Santa Cruz de La Sierra, Santa Cruz de La Sierra, Bolivia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2014). *Estudio Nacional del Agua (ENA)*. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras*. Departamento de Meta [CD ROM]. 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 de Colombia, Palmira, Colombia.
- Jamioy, D., Menjivar, 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.
- Manzano, J., Rivera, P., Briones, F., & Zamora, C. (2014). Rehabilitación de suelos salino-sódicos: estudio de caso en el distrito de riego 086, Jiménez, Tamaulipas, México. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 211-219.
- Ossa, G., Suárez, M., & Pérez, J. (2005). Efectos del medio y la herencia sobre el peso al destete de terneros de la raza romosinuano. *Revista MVZ Córdoba*, 10(2), 673-683.
- Oviedo, C., Pastrana, A., Maza, L., Salgado, R., Vergara, O. (2011). Suplementación de terneras lactantes doble propósito en la época seca en el valle medio del Sinú, Colombia. *Revista Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales*, 14(1), 57-62.
- Peña, R., Rubiano, Y., Peña, A., & Chaves, B. (2009). Variabilidad espacial de los atributos de la capa arable de un inceptisol del piedemonte de la cordillera oriental (Casanare, Colombia). *Agronomía Colombiana*, 27(1), 111-120.
- Roldán A., Perdomo, P., Sánchez, H., & Ramírez, M. (2000). Tecnificación del sistema de producción ganadera de doble propósito en el trópico alto andino colombiano: amamantamiento restringido. *Livestock Research for Rural Development*, 12(2). Recuperado de <http://www.lrrd.org/lrrd12/2/rol122.htm>.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2010). *Keys of soil taxonomy*. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/taxonomy/?cid=nrcs142p2_053580.
- Van Bavel, C. H. M. (1949). Mean Weight-Diameter of Soil Aggregates as a Statistical Index of Aggregation. *Science Society of America Journal*, 14, 20-23.