



01

# Investigación bajo condiciones controladas en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Édgar Fernando Almansa Manrique  
Julián Andrés Peláez Montoya  
Ruth Lucena Marín Romero

En un pozo petrolero el mayor producto de desperdicio es lo que se conoce como agua de producción. Según Mesa *et al.* (2018), “el agua de la industria del petróleo en Colombia se usa y/o se genera en las fases de exploración, producción, transporte y refinación; siendo más alto su consumo en la fase de producción, con 91,72% del total. En esta fase se incluyen actividades como: vertimientos industriales, vertimientos domésticos, aguas de producción, reinyección para recobro mejorado, inyección como destino final, y vertimiento a cuerpos de agua”.

En los últimos tiempos, debido a una creciente preocupación de la sociedad por los temas ambientales y siendo Ecopetrol una empresa comprometida con el cuidado y conservación del medio ambiente en los sitios en donde realiza sus actividades de explotación, conformó una alianza con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) con el objetivo de investigar las posibilidades de utilizar el agua de producción previamente tratada en los STAP en sistemas agropecuarios.

El agua de producción puede ser tratada y eliminada por varios métodos, la mayoría de los cuales se limitan a cumplir con lo establecido en la norma ambiental para vertir dicho líquido a corrientes superficiales. En todo caso, el agua tratada debe cumplir con la normatividad colombiana sobre el uso de aguas residuales tratadas (Resolución 1207 de julio de 2014).



## Materiales y métodos

Para el monitoreo del efecto de las aguas tratadas de producción en cultivos bajo condiciones controladas, se implementó la técnica de lisímetros plásticos con fondo (área superficial de 1 m<sup>2</sup>), que consiste en mantener un volumen de suelo conocido al cual se le siembra un cultivo y se le aplica periódicamente una dosis de agua hasta alcanzar la cosecha bajo condiciones de manejo agronómico similares a las que se observan en un cultivo convencional.

## Ubicación

La investigación bajo condiciones controladas se ubica geográficamente en dos localidades del piedemonte llanero; específicamente, en el Centro de Investigación La Libertad de Agrosavia, en el municipio de Villavicencio, y en Castilla La Nueva, en la estación 2, pozo 10 de Ecopetrol.

El invernáculo 1 del CI La Libertad se encuentra localizado geográficamente a los 04° 3' 32,39" latitud norte y 73° 27' 59,86" longitud oeste. Está constituido por 64 tanques lisimétricos, y el suelo empleado presenta textura franco arenosa arcillosa (FArA). Por su parte, el invernáculo 2 de esta misma localidad se encuentra ubicado geográficamente a los 04° 3' 42,45" latitud norte y 73° 27' 39,87" longitud oeste, y está conformado por 16 tanques lisimétricos; el suelo utilizado es de textura franco arenosa (FA).

Los invernáculos 1 y 2 de la localidad de Castilla La Nueva se encuentran ubicados en la vereda Cacayal 03° 53' 26,66" latitud norte y 73° 40' 44,02" longitud oeste, en terrenos de Ecopetrol aledaños a la estación 2, cerca de las piscinas de tratamiento de aguas de producción. Esta área consta de 80 tanques lisimétricos, y los suelos utilizados son de textura franco arcillosa (FAr).

## Metodología



Se implementó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos de calidad y dotación de agua y tres repeticiones.



Se establecieron tres coberturas: caña de azúcar (CC-8592), pasto elefante y suelo desnudo.



Se utilizaron láminas de riego controladas (según el consumo registrado con medidores de humedad edáficos), con una frecuencia de dos riegos semanales.



Se evaluaron dos calidades de agua (ATAEP y agua normal) y dos límites de agua (suministro de agua para mantener el 100% y el 80% de la humedad disponible en el suelo para la planta). Para el invernáculo ubicado en Castilla La Nueva, el agua normal (N) proviene del Caño Grande, y la ATAEP de Ecopetrol (E), del STAP de la estación Castilla 2.

Para el caso de los invernáculos ubicados en el CI La Libertad, los volúmenes de agua normal (N) provinieron del pozo profundo utilizado en el centro, y la ATAEP de Ecopetrol (E) se obtuvo del STAP de la estación Apiay.

- Se realizó semestralmente un muestreo de suelos con el fin de evaluar las variaciones químicas, físicas, microbiológicas y ambientales debidas a los tratamientos.

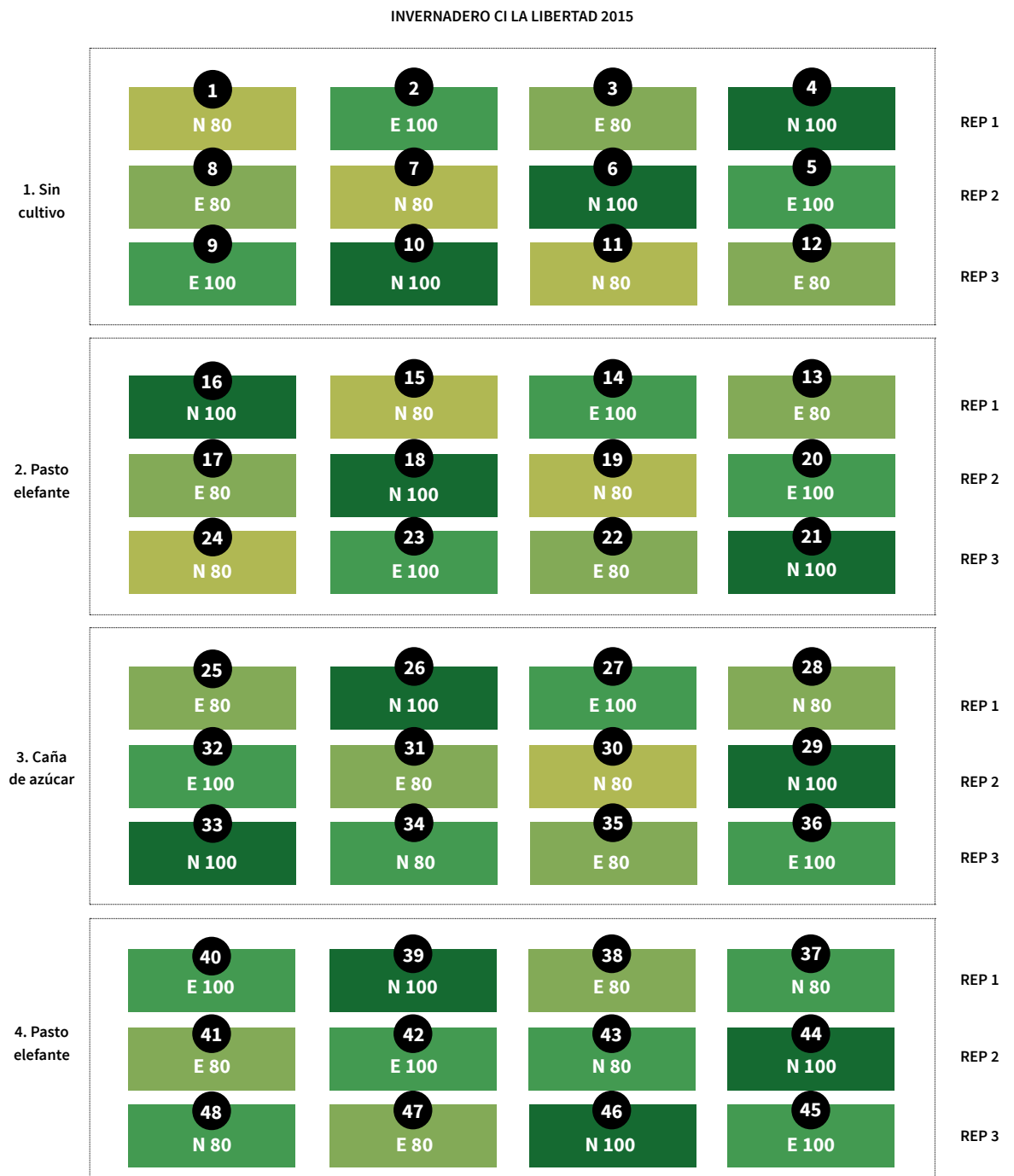
- Se monitoreó semanalmente cada tipo de agua mediante lecturas de conductividad eléctrica, salinidad, pH y temperatura.

- Mensualmente, se monitorearon los parámetros vegetativos de las especies establecidas, y al final de cada ciclo se hicieron análisis de tejido vegetal y bromatológico.

En las figuras 1 y 2 se presenta la disposición de los ensayos por localidad.

**E:** agua de Ecopetrol.

**N:** agua normal.



→ **Figura 1.** Plano del invernadero del CI La Libertad

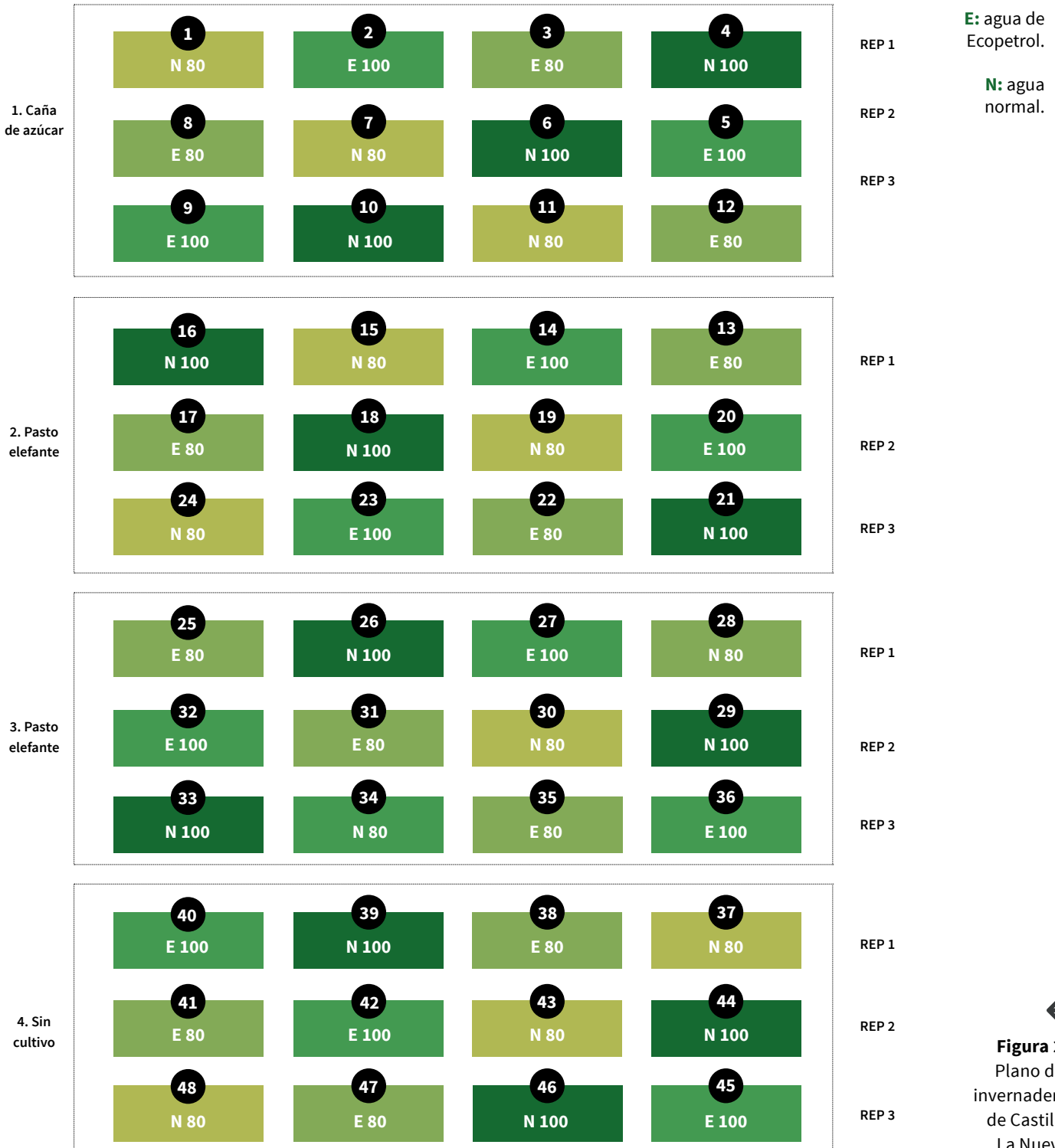
✓ Se monitorearon las condiciones ambientales por medio de estaciones climáticas automatizadas (temperatura del ambiente y edáfica, humedad relativa, brillo solar, radiación).

✓ Se realizó permanentemente el manejo agronómico recomendado a las especies establecidas.

✓ Para el análisis de resultados se utilizó el paquete estadístico SAS (software JMP®), con estadística descriptiva, análisis de varianza y prueba de comparación de medias por Tukey con un nivel de significancia del 5%.

Investigación  
bajo condiciones  
controladas en el  
CI La Libertad y en  
Castilla La Nueva

INVERNADERO CASTILLA 2015 Vía



←  
**Figura 2.**  
Plano del  
invernadero  
de Castilla  
La Nueva



# Resultados y discusión

Según García, Moreno, Hernández y Polo (2002),

**El suelo es un recurso natural no renovable, al menos en una escala de tiempo humano (Jenny, 1980). Tenemos por tanto la obligación de mantenerlo y conservarlo para presentes y futuras generaciones. Esto implica la necesidad de adaptarlo a diversos usos (agricultura, bosque, suelo urbano, industria... [recreativo]), pero siempre tendiendo hacia una “sostenibilidad” de dicho recurso natural, de manera ordenada y controlada. En condiciones naturales, el suelo tiende a un estado de equilibrio tras un lento proceso de formación denominado edafogénesis (Albaladejo y Diaz, 1990). En estas condiciones el suelo se encuentra cubierto por una vegetación que le aporta una cantidad progresiva de materia orgánica y de nutrientes, y produce una mejora en su estructura. Puede decirse entonces que los suelos mantienen una calidad adecuada. El suelo, además de sus funciones como soporte físico y productor de alimentos y fibras, juega un papel esencial en el mantenimiento de la calidad del aire, almacenamiento de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos, y como medio purificador de contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos.**

**El suelo está formado por material inorgánico (arena, limo y partículas arcillosas), materia orgánica, agua, gases y organismos vivos (lombrices, insectos, algas, bacterias, hongos, etc.), entre los que se produce un intercambio continuo de moléculas mediante procesos físicos, químicos y biológicos. De ahí se deduce que para poder establecer la calidad de un suelo, el estudio de todo tipo de propiedades (físicas, químicas, biológicas y microbiológicas) es imprescindible.**

**A diferencia del agua y del aire, los cuales poseen claros estándares de calidad, para el suelo es difícil definir y cuantificar dicha calidad. Esto es debido a que los criterios que deben de usarse**

**cuando se trata de suelos pueden variar según el uso a que se destinen, las prácticas de manejo que se utilicen, e incluso las prioridades socioeconómicas y/o políticas.**

**La Calidad del Suelo no es fácil de definir, pues depende del uso que se le vaya a dar a dicho suelo (agrícola, forestal, urbano, industrial [recreativo]). Una de las definiciones posibles es la que ofrecieron Doran y Parkin en 1994, definiendo la calidad de un suelo como su capacidad para mantener su productividad biológica, su calidad ambiental, promoviendo además la salud de animales, plantas y el propio ser humano.**

## Efecto en suelos

Para conocer los efectos en el suelo del riego con ATAEP en la producción de cultivos se realizaron diferentes tipos de análisis y determinaciones (físicas, químicas, microbiológicas y ambientales). De este modo fue posible cuantificar el contenido de elementos minerales aportados por esta práctica y vislumbrar la posibilidad real de afectación al recurso edáfico.

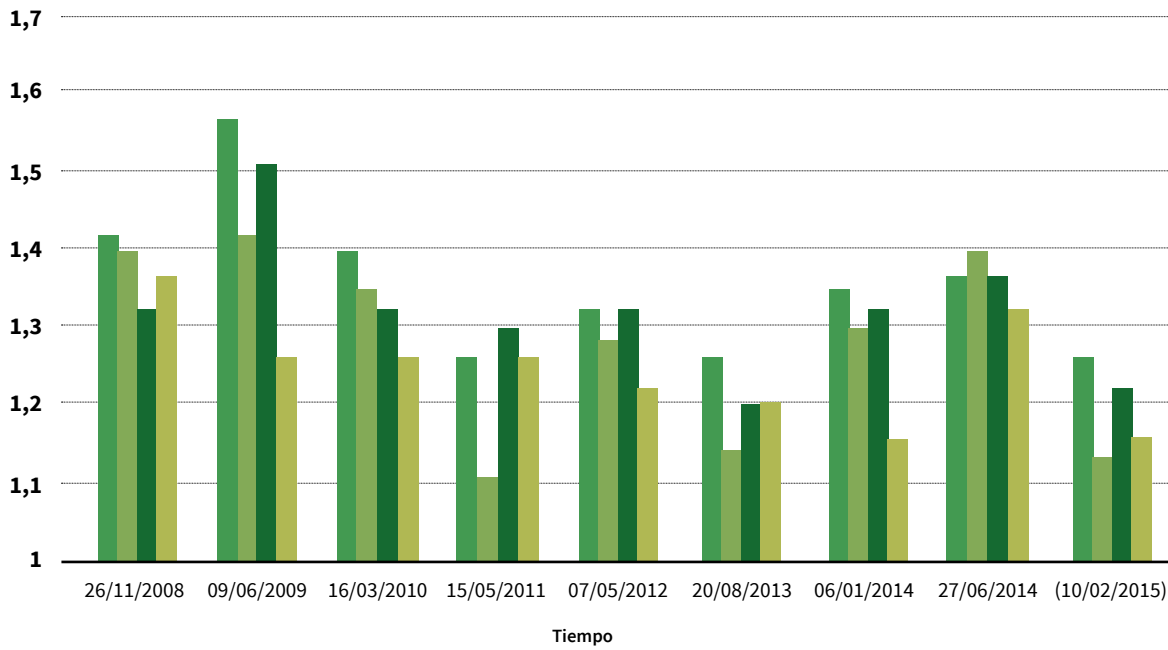
### Física de suelos

Las propiedades físicas del suelo permiten entender cómo las prácticas agronómicas que el hombre realiza para la producción de cultivos modifican y afectan la calidad del recurso. Sobre este conocimiento, se debería comprender la importancia y las posibles formas de mantener y mejorar las condiciones del suelo.

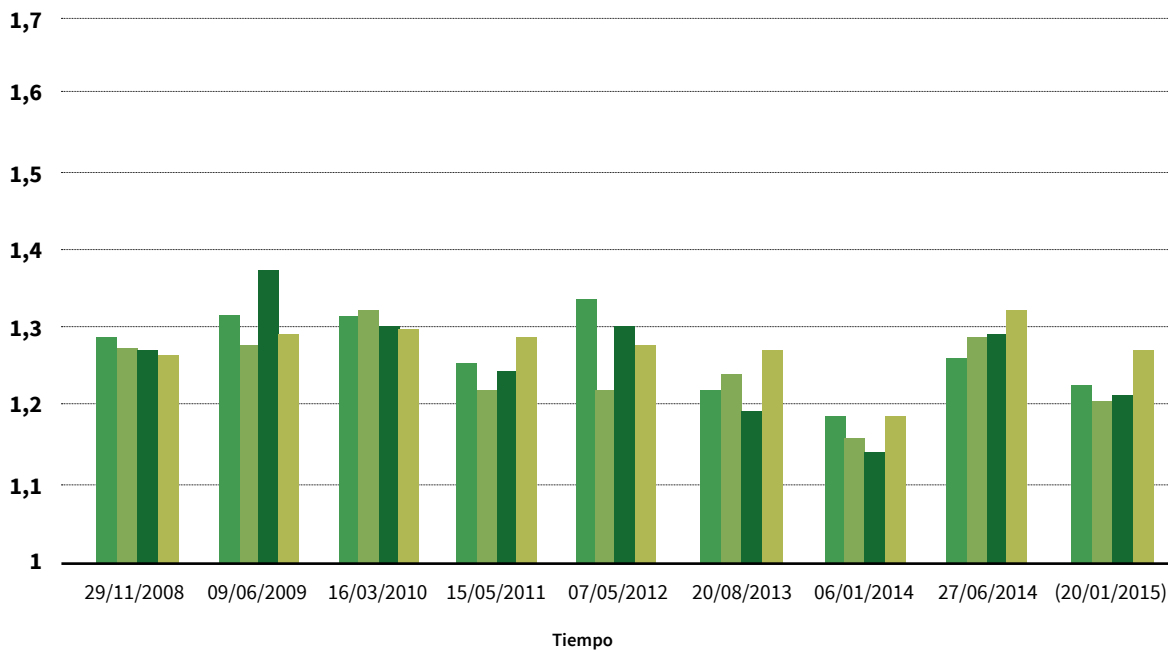
### Densidad aparente (DA)

La densidad aparente de un suelo se define como la relación que existe entre el peso seco de una muestra secada en horno (105 °C) y el volumen que esta muestra ocupaba en el suelo. Esta es una de las propiedades más estudiadas en física de suelos por su importancia para cuantificar la compactación, la dispersión de agregados y la circulación de aire y agua, entre otros fenómenos producidos por prácticas agrícolas inadecuadas. Para el caso de esta investigación se determinó el efecto del uso de ATAEP en el suelo y se comparó con el de agua normal (no petrolera). En la figura 3 y en la tabla 1 se presentan los resultados encontrados en los lisímetros con cultivo y sin cultivo de las localidades CI La Libertad y Castilla La Nueva.

Densidad aparente (g.cm<sup>-3</sup>) lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



Densidad aparente (g.cm<sup>-3</sup>) lisímetros sin cultivo - Castilla La Nueva



Investigación  
bajo condiciones  
controladas en el  
CI La Libertad y en  
Castilla La Nueva

- E 100 ●
- E 80 ●
- N 100 ●
- N 80 ●

←  
**Figura 3.**  
Comportamiento de la densidad aparente (g.cm<sup>-3</sup>) en los lisímetros en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	DA (g.cm <sup>-3</sup> )			
	Media	Media	Media	Media
E100	1,39 a	1,23 a	1,35 a	1,35 a
E80	1,38 a	1,21 a	1,33 a	1,28 bc
N100	1,31 b	1,20 a	1,34 a	1,32 ab
N80	1,26 b	1,21 a	1,36 a	1,25 c

←  
**Tabla 1.**  
Resultados del análisis estadístico efectuado a la densidad aparente en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).  
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Como se observa, en el ensayo llevado a cabo en el CI La Libertad se encontró diferencia significativa de la densidad aparente debida al tipo de agua utilizada en los lisímetros sin cultivo que fueron regados permanentemente. En esta localidad, por otra parte, no se encontró influencia del agua en la densidad aparente en los lisímetros cuando contenían cultivos.

En Castilla La Nueva, asimismo, se encontró diferencia significativa en los lisímetros con cultivos debida principalmente a la dotación de riego (volúmenes de agua aplicada) y no a la calidad del agua, mientras que en los tratamientos sin cultivo no se presentó diferencia.

El valor de la densidad aparente encontrada en esta investigación para todos los casos es inferior a la normal reportada por Amézquita, Molina y Hoyos (2003) para un suelo franco arcilloso de la Orinoquia colombiana (1,46 g.cm<sup>-3</sup>). Para los mismos suelos, Almansa, Bernal y Argüello (2006) consideran que un valor de 1,3 g.cm<sup>-3</sup> permite una adecuada aireación y movimiento del agua.

**Porosidad total**

La porosidad constituye una de las características más importantes del suelo desde el punto de

vista de la fertilidad (Lora, 1998) y se define como la porción de espacios o cavidades ocupados por aire y agua que existe en un volumen de suelo. Este atributo depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo.

Lo normal es que los suelos con fracciones gruesas presenten también poros gruesos, y los suelos limosos y arcillosos, huecos muy numerosos, pero de tamaño pequeño. Son por tanto los suelos coloidales los que tienen la mayor porosidad. Para una correcta aireación del suelo y una buena retención de agua, es conveniente que la porosidad se sitúe entre el 40% y el 60%. Valores menores del límite inferior pueden crear asfixia en las raíces, contenidos de agua retenida muy bajos, o ambas cosas a la vez, en tanto que un valor superior al límite máximo supone una dificultad para el contacto entre el suelo y las raíces de las plantas.

En la figura 4 se muestra, para las dos localidades contempladas, el comportamiento de la porosidad a través del tiempo. Por otra parte, en la tabla 2 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado utilizando el programa SAS, en donde se trató de determinar si en el tiempo la porosidad total se había afectado por los tratamientos de manejo utilizados.

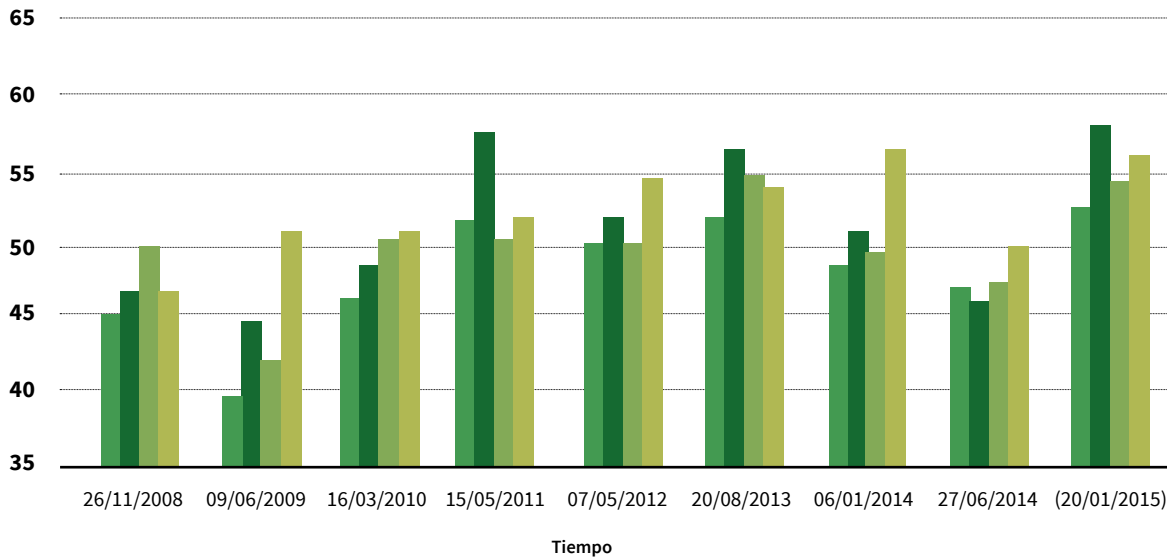


**Tabla 2.** Resultados del análisis estadístico efectuado a la porosidad total del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Porosidad total (%)			
	Media	Media	Media	Media
E100	47,44 b	52,97 a	48,70 a	48,76 c
E80	47,36 b	54,23 a	49,40 a	54,40 ab
N100	50,69 a	54,69 a	49,40 a	50,17 bc
N80	52,08 a	54,36 a	48,23 a	52,47 a

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

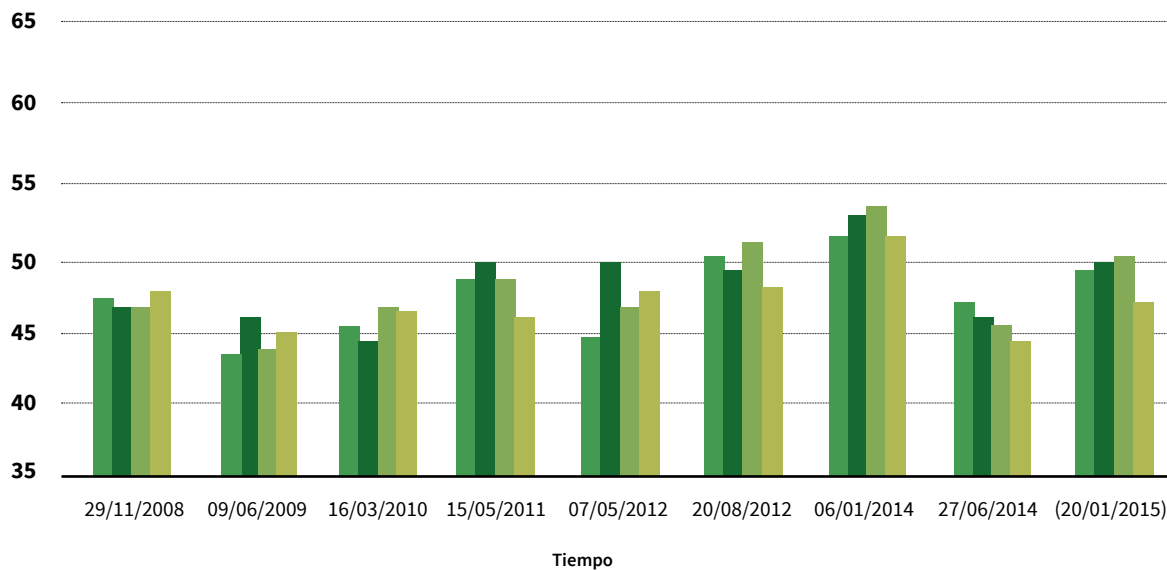
Porosidad (%) en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



Investigación bajo condiciones controladas en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

- E 100 ●
- E 80 ●
- N 100 ●
- N 80 ●

Porosidad (%) en lisímetros sin cultivo - Castilla La Nueva



←  
**Figura 4.**  
Comportamiento de la porosidad en suelos de los lisímetros en Castilla La Nueva

Como se observa, en el ensayo llevado a cabo en el CI La Libertad se encontró diferencia significativa de la porosidad total debida al tipo de agua utilizada en los lisímetros sin cultivo que fueron regados permanentemente, mientras que no se encontró influencia del agua en la porosidad total en los lisímetros cuando contenían cultivos. Por otra parte, en Castilla La Nueva se encontró diferencia significativa en los lisímetros con cultivos debida a los tratamientos, y en los tratamientos sin cultivo no se presentó diferencia.

El valor de la porosidad encontrada en esta investigación para todos los casos es superior a la

normal reportada por Amézquita, Hoyos y Molina (2003) para suelos franco-arcillosos (45%) y franco arenosos (40%) de la Orinoquia colombiana. Según Salinas y Valencia (1983), para suelos oxisoles y ultisoles de la América tropical, el espacio poroso alcanza valores entre el 40% y el 50% del volumen del suelo, del cual aproximadamente dos tercios corresponden a microporos.

En definitiva, se puede establecer que los valores encontrados en la porosidad del suelo en los ensayos realizados en las dos localidades no presentaron valores críticos que indicaran afectación negativa por los tratamientos de manejo realizados.

## Estabilidad estructural

Según la FAO, la estructura del suelo se define como la disposición de las partículas elementales del suelo (arena, limo y arcilla) en agregados mayores o terrones que forman cuerpos separados a los agregados vecinos y tienen propiedades diferentes a las partículas elementales sin agregación.

Por otra parte, la estabilidad de la estructura es definida como la resistencia que los agregados del suelo ofrecen a los agentes disgregantes externos. En otras palabras, la estabilidad estructural representa la resistencia a toda modificación de los agregados. El principal agente destructor de la estructura del suelo es el agua.

Según Quiroz (2009),

**La inestabilidad de los agregados se debe principalmente al tipo de arcilla, a la naturaleza de los productos de la descomposición de la materia orgánica, a los cationes asociados con los coloides (el exceso de sodio provoca dispersión de partículas) y a la naturaleza de la floculación microbiana (los micelios y las sustancias gomosas producidas por las bacterias favorecen la agregación). El pH y la cantidad de calcio también influyen (Narro, 1994).**

La degradación de la estructura del suelo depende de factores y condiciones diversas. De ello resulta que los métodos propuestos para determinar esta propiedad sean variados. Baver, Gardner y Gardner (1973) expresaron que la estructura del suelo

se evalúa determinando el grado de agregación, la estabilidad de los agregados y la naturaleza del espacio poroso, características que cambian con el laboreo del suelo y los sistemas de cultivo. Por su parte, en 1949 Van Bavel introdujo el concepto del diámetro ponderado medio de los agregados del suelo como índice de agregación.

En la tabla 3 se presenta una clasificación (Montenegro) con los rangos para interpretar la estabilidad estructural del suelo con relación al diámetro ponderado medio (DPM).



**Tabla 3.** Rangos para interpretar la estabilidad estructural del suelo con relación al DPM

DPM (mm)	Interpretación
<0,5	Inestable
0,5-1,5	Ligeramente estable
1,5-3,0	Moderadamente estable
3,0-5,0	Estable
Mayor de 5,0	Muy estable

Fuente: Montenegro (2003).

En la tabla 4 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado para las dos localidades. Asimismo, en la figura 5 se observa el comportamiento temporal de la estabilidad de agregados para todos los tratamientos considerados.



**Tabla 4.**

Resultados del análisis estadístico efectuado a la estabilidad de agregados del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

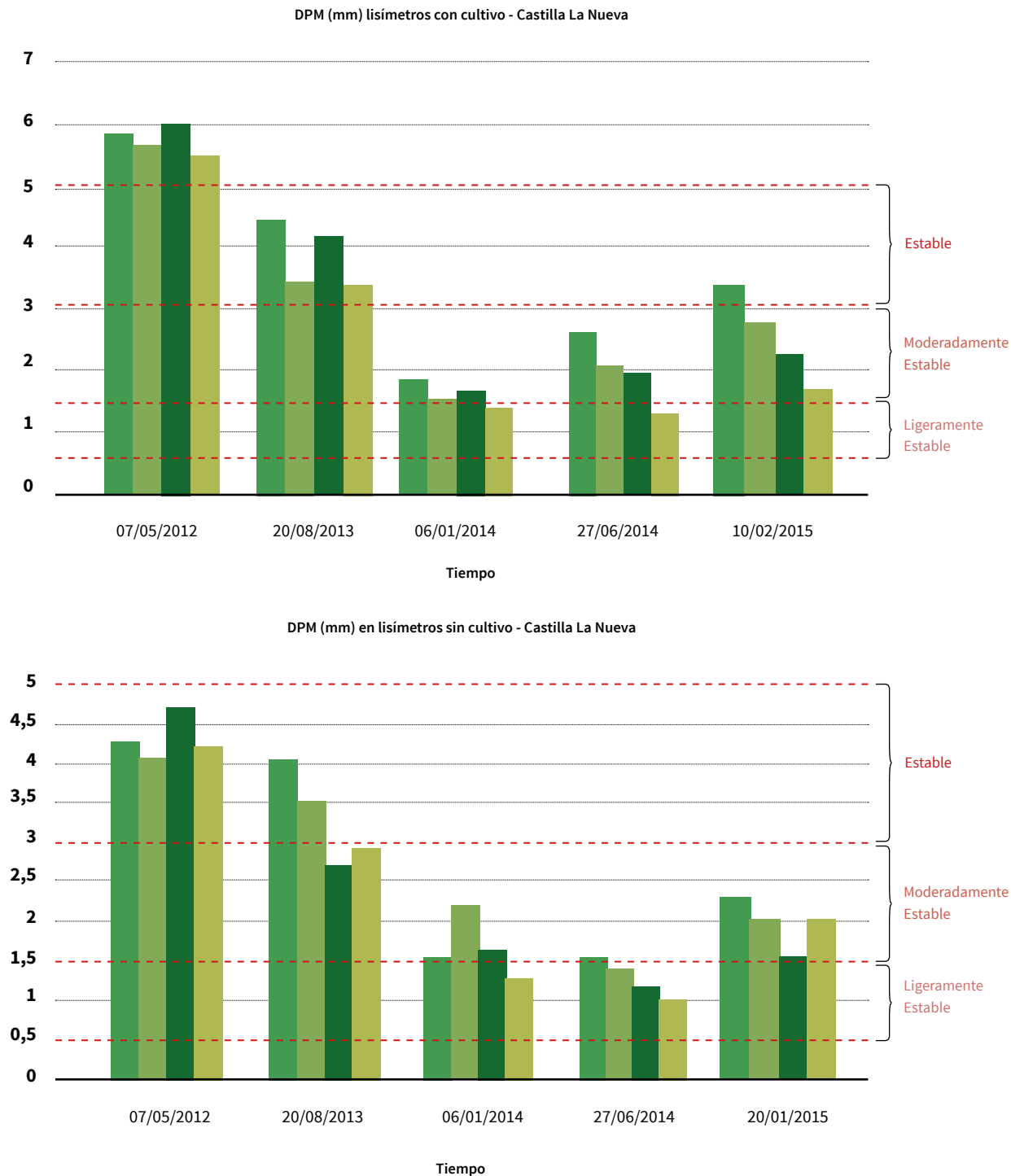
Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Estabilidad de agregados DPM (mm)			
	Media	Media	Media	Media
E100	2,38 a	3,13 a	2,73 a	3,41 a
E80	1,84 b	2,30 b	2,62 a	3,00 ab
N100	1,45 b	1,76 c	2,36 a	2,93 ab
N80	1,75 b	1,49 c	2,28 a	2,47 b

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Así pues, al evaluar la estabilidad estructural teniendo en cuenta el DPM, en el CI La Libertad se evidenció una tendencia, con diferencia significativa de los lisímetros sometidos a tratamientos de riego con ATAEP (E100), a presentar condiciones de suelo moderadamente estable (sin cultivo), y en el caso con cultivo se obtuvo una clasificación estable (3,13 mm). En la localidad de Castilla La Nueva, por otra parte, los tratamientos en lisímetros con agua tratada de producción en condiciones

de cultivo presentaron valores de DPM interpretados como estables. En el caso sin cultivo, el DPM se clasificó como moderadamente estable en todos los casos, sin diferencias significativas entre los tratamientos.

En general, se observa que las mejores condiciones de estabilidad de los agregados valorados con el método de DPM las presentan los tratamientos con cultivo y en donde se han utilizado ATAEP para el riego.



←  
**Figura 5.**  
Comportamiento de la  
estabilidad  
estructural  
en Castilla La  
Nueva

## Química de suelos

“La química de suelos se define como aquella parte de la ciencia que estudia la composición, las propiedades y las reacciones químicas que se dan en este recurso” (SSSA, 2008). Los mayores esfuerzos de aplicación de esta rama del saber se dirigen a tratar de comprender, explicar y resolver problemas relacionados con la dinámica de los nutrientes vegetales y con la fertilidad y salud del suelo.

La calidad del suelo se define como “la capacidad del suelo de funcionar, dentro de las fronteras del ecosistema y el uso de la tierra, manteniendo la calidad ambiental y fomentando el desarrollo de plantas, los animales y el ser humano” (<http://www.fao.org/soils-portal> de suelos).

Las propiedades químicas del suelo conciernen fundamentalmente a los contenidos de diferentes nutrientes importantes para el desarrollo óptimo de las plantas y que le dan al suelo diferentes características de acuerdo al origen y a las condiciones en que se ha formado. El conocimiento de estas propiedades permite reconocer ciertas características del suelo respecto a su manejo y a los cambios químicos originados por la acción antrópica y las nuevas reacciones que alteran el estado de equilibrio natural del recurso.

### Calcio

Debido a que el calcio existe como un catión, este nutriente está gobernado por los fenómenos del intercambio catiónico y se mantiene adherido como  $\text{Ca}^{++}$  intercambiable en la superficie de los coloides cargados negativamente.

Las concentraciones más bajas de calcio ocurren en suelos muy lavados, con capacidades de intercambio catiónico bajas. Tales condiciones se dan en algunos suelos tropicales que contienen un predominio de arcillas óxidas. En algunos de estos casos puede existir respuesta de los cultivos al calcio como fertilizante, pero la cuestión no se encuentra aún suficientemente documentada.

Para los suelos de los llanos orientales, Amézquita *et al.* (2003) encontraron valores normales de calcio en suelos de textura franco arcillosa de  $0,11 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$  y de  $0,20 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$  para suelos de textura franco arenosa. Para ambos tipos de suelo se propuso como meta alcanzar en dos años un valor mínimo de  $1,5 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$  con miras a garantizar la salud y productividad de este recurso. En este experimento se han registrado valores mayores que la meta planteada por estos investigadores en suelos naturales ácidos con alto contenido de aluminio.

En la tabla 5 se presentan los resultados del análisis estadístico multitemporal realizado para las dos localidades consideradas. En ambos ámbitos se encontró que los tratamientos de manejo en donde se utilizó ATAEP para riego mostraron diferencias significativas con relación a aquellos en donde se empleó agua normal. Los valores más altos se dieron en los tratamientos con cultivos en relación con los lisímetros en donde no se establecieron cultivos.

Teniendo en cuenta que en el CI La Libertad la textura del suelo encontrada tiene mayor contenido de arena (FArA) que la del de Castilla La Nueva (FAr), se corrobora lo expuesto por Amézquita y colaboradores con relación al mayor contenido de calcio en estos suelos, lo que en cierta forma es una característica de los suelos de la Orinoquia colombiana.



**Tabla 5.**

Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de calcio en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Calcio ( $\text{cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			
	Media	Media	Media	Media
E100	3,31 a	5,04 a	2,34 b	2,35 b
E80	2,80 b	4,18 b	2,90 a	2,70 a
N100	1,82 c	1,64 c	1,57 c	1,16 c
N80	1,91 c	1,68 c	1,48 c	0,90 d

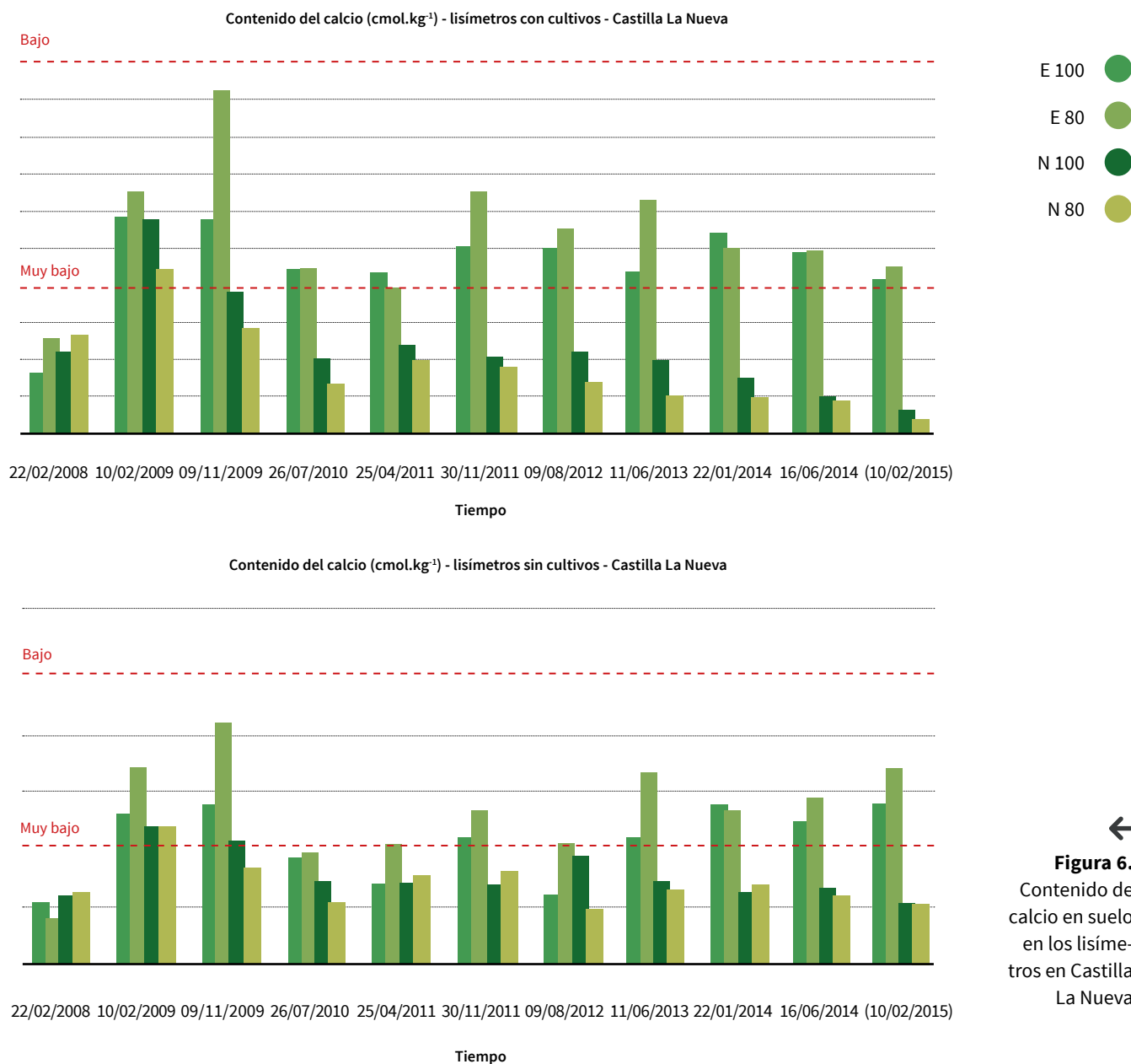
\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

En la figura 6 se presenta la variación temporal del calcio para los tratamientos con y sin cultivo en las dos localidades. Esta gráfica se basa en un sistema de interpretación del tenor de calcio con base en lo descrito por Andrades y Martínez (2014), de la Universidad de La Rioja.

miento de los meristemos y, particularmente, para el desarrollo y funcionamiento adecuados de los ápices de las raíces. En los lisímetros sin cultivo, entretanto, se presentó una disminución del calcio en los tratamientos (N) debido a que el agua natural no aporta suficiente calcio con relación a las ATAEP (E).

Como se puede observar, existen contenidos mayores de calcio en el muestreo inicial con relación al final en los tratamientos con agua normal (N100-N80), mientras que en los tratamientos con ATAEP (E100-E80) se observa una tendencia a que el contenido aumente en el transcurso del tiempo. Para el caso de los lisímetros con cultivos, este elemento es extraído para su desarrollo vegetativo, el cual es esencial para el creci-

En el ensayo del CI La Libertad, en los lisímetros con y sin cultivo y en el tratamiento de riego con ATAEP, los contenidos de calcio se mantienen en el transcurso del tiempo en condiciones calificadas por Andrades *et al.* (2014) como bajas; sin embargo, en todos los casos superan los  $1,5 \text{ cmol.kg}^{-1}$ , que es la meta fijada por Amézquita *et al.* (2003) como indicador deseable para los oxisoles de la Orinoquia colombiana.



←  
**Figura 6.**  
Contenido de calcio en suelo en los lisímetros en Castilla La Nueva

## Magnesio

El magnesio es un elemento fundamental para la realización de varias funciones importantes en los vegetales como la síntesis de xantofilas y carotenos. Asimismo, se comporta como activador de varias enzimas, particularmente aquellas involucradas en el metabolismo de carbohidratos y proteínas que contribuyen a mantener una turgencia óptima de las células y participan en la formación de carbohidratos en la planta. Uno de los papeles más importantes del magnesio se encuentra en el proceso de la fotosíntesis ya que es un componente elemental de la clorofila. Según Salinas y Valencia (1983), el contenido representativo de los

oxisoles de la Orinoquia colombiana es de  $0,1 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Amézquita *et al.* (2003) sitúan este tenor según la textura del suelo entre  $0,09 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$  para suelos arcillosos y  $0,07 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$  para suelos francos. Según Andrades y Martínez (2014), valores por debajo de 0,25 son considerados muy bajos, y Amézquita *et al.* (2003) consideran  $0,6 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$  como un valor aceptable para mantener la salud y fertilidad del suelo (oxisol).

En la tabla 6 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a la información multitemporal de este parámetro del suelo en las dos localidades. Asimismo, en la figura 7 se observa la variación temporal del registro de magnesio.



**Tabla 6.** Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de magnesio en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

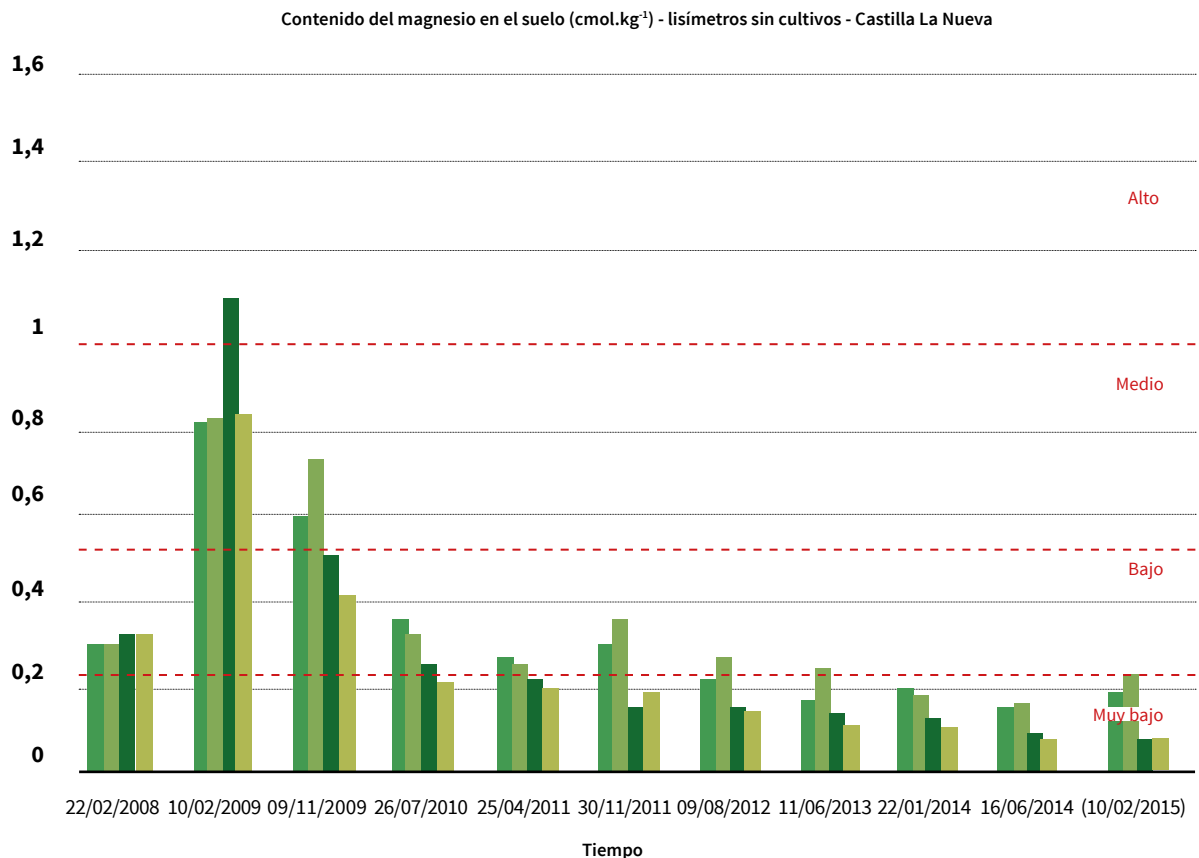
Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Magnesio ( $\text{cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			
	Media	Media	Media	Media
E100	0,66 a	0,84 a	0,48 a	0,34 ab
E80	0,61 b	0,80 a	0,55 a	0,37 a
N100	0,52 c	0,40 b	0,47 a	0,30 bc
N80	0,47 d	0,43 b	0,39 b	0,25 c

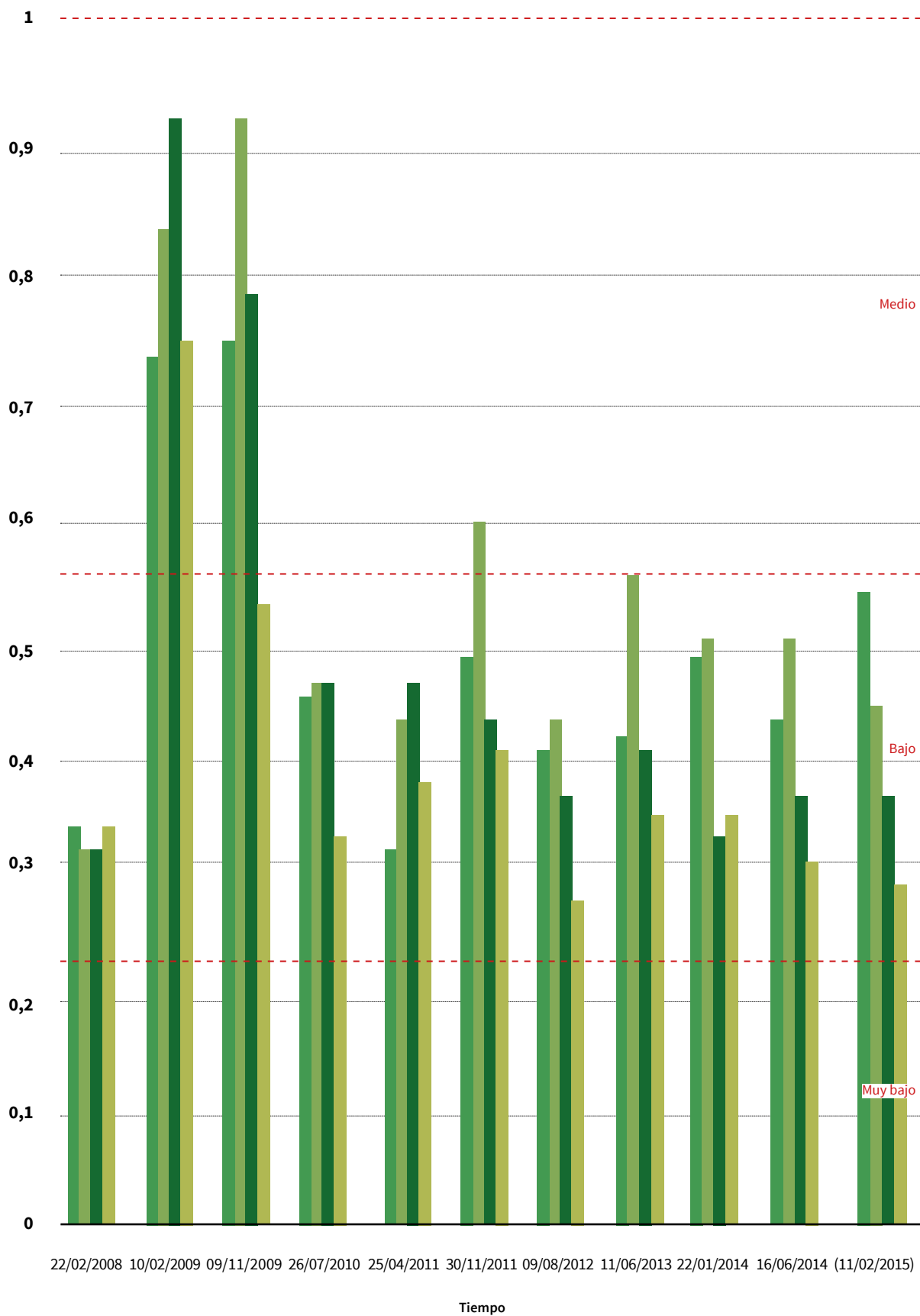
\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

- E 100
- E 80
- N 100
- N 80



**Figura 7a.** Contenido de magnesio ( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) en suelos en los lisímetros en Castilla La Nueva





←  
**Figura 7b.**  
Contenido de  
magnesio (cmol.  
kg<sup>-1</sup>) en suelos en  
los lisímetros en  
Castilla La Nueva

Los contenidos de magnesio en los lisímetros con cultivo y sin cultivo de las dos localidades presentan disminución a través del tiempo después de la aplicación de las enmiendas, como lo muestra la figura 7. La deficiencia de este nutriente restringe el desarrollo radicular, en especial en el cultivo de caña de azúcar, debido principalmente a la extracción de este elemento para el desarrollo vegetativo (Humbert, 1974; Silva y Casagrande, 1983, citado por Durán, 1998).

Es importante resaltar que en la localidad de Castilla La Nueva el contenido de magnesio se mantiene por debajo del nivel considerado bajo para los tratamientos sin cultivo y fue muy bajo cuando se establecieron cultivos.

En el CI La Libertad, por otro lado, se encontró que los tratamientos regados con agua de producción presentaron niveles medios de magnesio, y los suelos regados con agua normal en los que se establecieron cultivos manifestaron niveles muy bajos del elemento.

En general, solamente los tratamientos regados con ATAEP en el CI La Libertad alcanzaron el criterio esbozado como normal para oxisoles de los llanos colombianos por Amézquita *et al.* (2003) ( $\geq 0,6 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ ).

## Potasio

El potasio es un nutriente esencial para las plantas, requerido en grandes cantidades para el crecimiento y la reproducción de estas. Se considera segundo en importancia luego del nitrógeno, cuando se trata de nutrientes que necesitan las plantas, y es generalmente considerado como el “nutriente de calidad”. El potasio afecta la forma, el tamaño, el color y el sabor de la planta y a otras medidas atribuidas a la calidad del producto.

Según Salinas y Valencia (1983), el contenido de potasio representativo de los oxisoles de la Orinoquia colombiana es de  $0,1 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ . Amézquita *et al.* (2003) sitúan este tenor según la textura del suelo entre  $0,09 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$  para suelos arcillosos y  $0,04 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$  para suelos francos. Según Andrades y Martínez (2014), valores por debajo de  $0,12$  son considerados muy bajos. Amézquita *et al.* (2003) consideran  $0,15 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$  como un valor aceptable para mantener la salud y fertilidad del suelo (oxisol).

En la tabla 7 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a la información multitemporal de este parámetro del suelo en las dos localidades. Asimismo, en la figura 8 se observa la variación temporal del registro del potasio.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Potasio ( $\text{cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ )			
	Media	Media	Media	Media
E100	0,27 a	0,19 b	0,23 b	0,19 a
E80	0,25 a	0,21 a	0,26 a	0,18 a
N100	0,09 b	0,10 c	0,13 c	0,16 a
N80	0,10 b	0,10 c	0,14 c	0,19 a



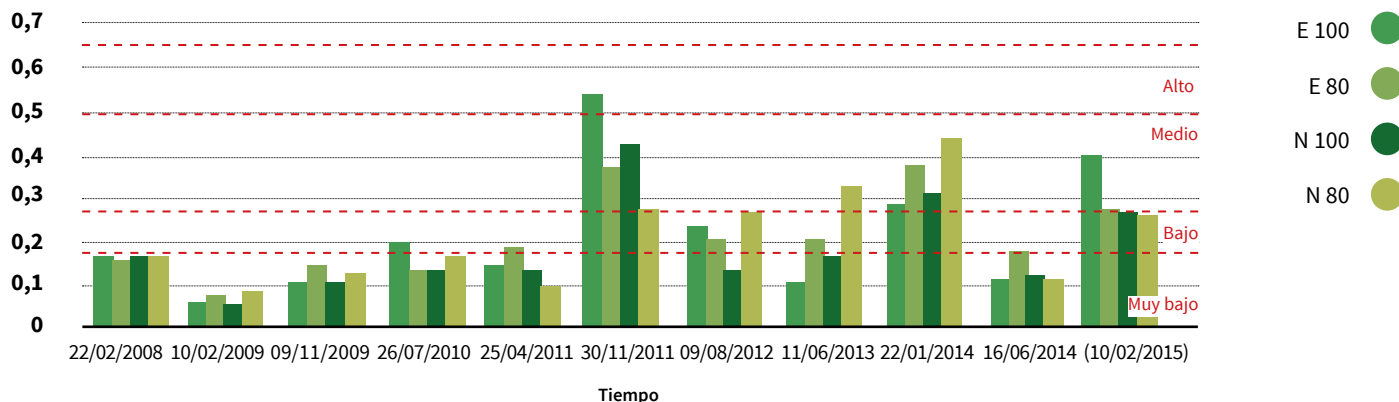
**Tabla 7.** Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de potasio en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

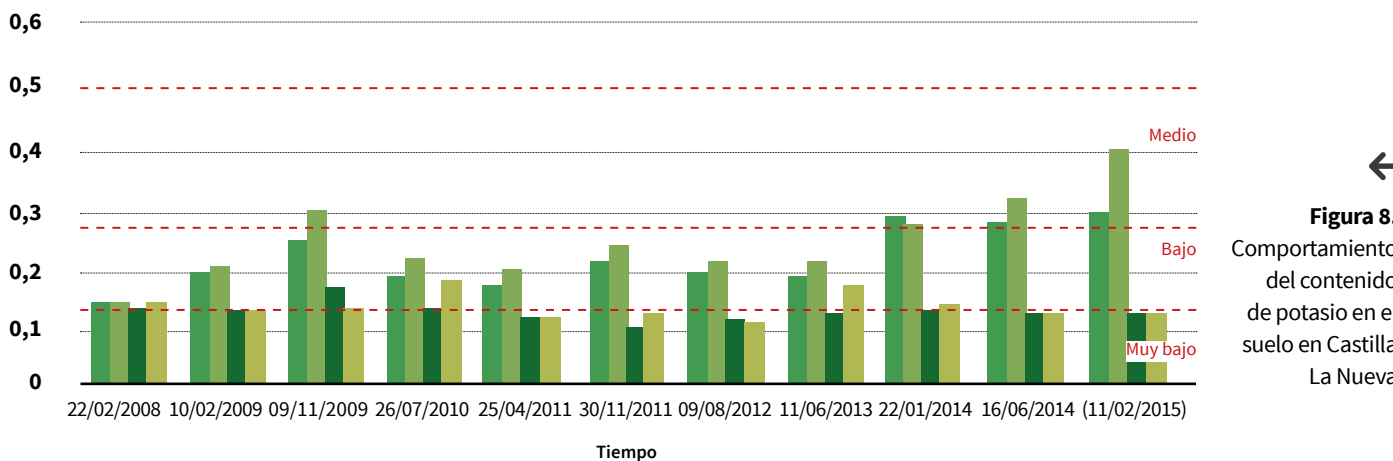
Como se puede observar, existen diferencias significativas en los tratamientos con ATAEP, a excepción de los tratamientos con cultivos en Castilla La Nueva. Por otro lado, para el caso de los tratamientos en los lisímetros sin cultivo para las dos localidades, se evidencia que las ATAEP realizan aportes de este elemento. Con relación a los lisímetros con cultivo se muestra una disminución del potasio a través del tiempo debi-

do a la extracción de este nutriente por la planta. En general, solamente los tratamientos regados con ATAEP en el CI La Libertad lograron la condición esbozada como aceptable por Amézquita *et al.* (2003) ( $\geq 0,15 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), mientras que en Castilla La Nueva todos los tratamientos lograron este nivel, posiblemente influenciados por el tipo de textura encontrada en esta localidad (mayor tenor de arcillas).

Contenido de potasio ( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



Contenido de potasio ( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) en lisímetros sin cultivo - Castilla La Nueva



←  
**Figura 8.**  
Comportamiento  
del contenido  
de potasio en el  
suelo en Castilla  
La Nueva

## Sodio

Para la mayoría de los cultivos, no se ha demostrado que el sodio sea esencial en su desarrollo, aunque se conoce que puede reemplazar al potasio en algunos casos. Muchas plantas cuentan con mecanismos que reducen la absorción y la translocación del sodio a las hojas, por lo que no es común que aparezcan síntomas de toxicidad en estas, ya que se acumula en tallos, troncos y raíces. El exceso de sodio puede provocar deficiencias de otros cationes, como potasio, calcio y magnesio.

El efecto perjudicial del sodio sobre los cultivos es, en la mayoría de los casos, indirecto, debido a la influencia negativa que tiene este catión sobre la estructura del suelo: el sodio desplaza al calcio y al magnesio del complejo arcillo-húmico, provocando así la dispersión de las partículas del suelo, lo que acarrea el desmoronamiento de la estructura de este, de manera que el recurso pierde su capacidad de aireación y de infiltración. Además, se produce alcalinización, pudiéndose elevar el pH por encima de 8,5.

El análisis de suelos normalmente reporta el valor del sodio intercambiable del suelo, el cual suele ser mayor que el sodio soluble; de hecho, usualmente, es un múltiplo (entre el doble y el quíntuplo) del sodio soluble. Dicho de otra forma, entre un 20% y un 50% del sodio que aparece en los análisis de suelos

reportados como sodio intercambiable es extraíble por el agua pura.

En la tabla 8 se presenta el resultado del análisis estadístico multitemporal realizado a este parámetro químico del suelo.



**Tabla 8.**

Resultados del análisis estadístico efectuado al contenido de sodio en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Sodio (cmol <sup>(+)</sup> .kg <sup>-1</sup> )			
	Media	Media	Media	Media
E100	1,88 a	1,76 a	0,72 b	2,24 a
E80	1,93 a	1,80 a	0,83 a	2,01 a
N100	0,12 b	0,11 b	0,12 c	0,18 b
N80	0,10 b	0,09 b	0,13 c	0,10 b

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).  
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

La concentración de sales confiere al suelo unas propiedades muy particulares con efectos nocivos para los cultivos. Este fenómeno se puede deber a causas naturales o a acciones antrópicas, y se distinguen dos situaciones, con morfologías, propiedades, génesis y usos de los suelos muy diferentes, según el catión predominante en el complejo de cambio: Na<sup>+</sup> o Ca<sup>++</sup>.

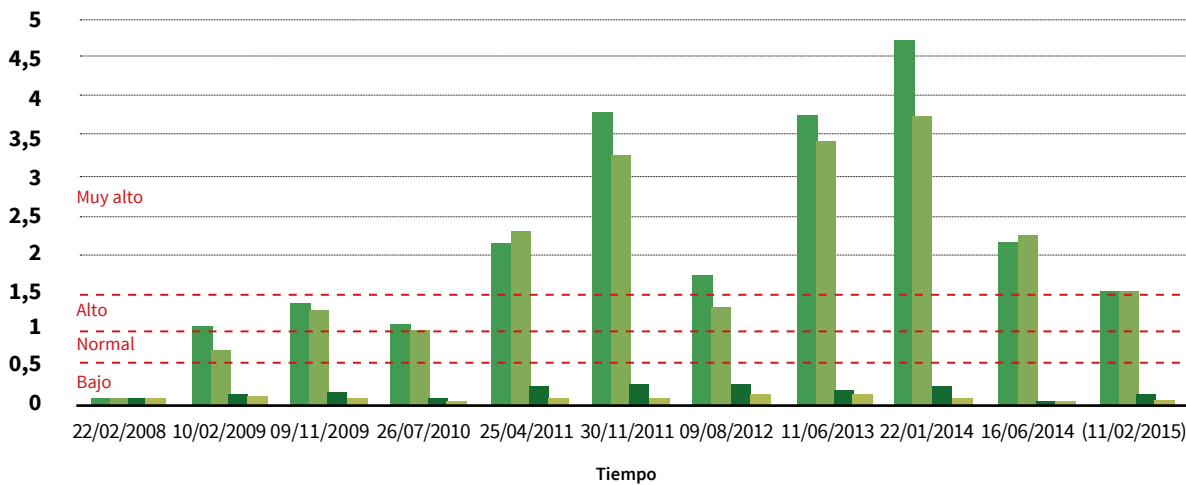
Si el catión predominante es el Ca<sup>++</sup>, las sales solubles son muy abundantes en el suelo. El perfil se encuentra muy poco diferenciado, pero su estructura tiende a ser estable, como resultado de la acción floculante del Ca<sup>++</sup>. Por otro lado, cuando el Na<sup>+</sup> es el catión dominante se produce la dispersión de las arcillas, lo que lleva a una destrucción de la estructura.

Al proceso de acumulación de sales en los suelos con predominio de calcio y de magnesio se le denomina salinización, y cuando es el sodio el que

predomina netamente, en el suelo se desarrolla un proceso llamado alcalinización. Existen importantes cantidades de sales sódicas neutras carentes de propiedades alcalinizantes (principalmente cloruros y sulfatos) y sales de calcio y magnesio.

En la figura 9 se observa, para todos los tratamientos y en las dos localidades, el comportamiento temporal del contenido de sodio en el suelo de los lisímetros. Se advierte que en todos los casos considerados los tratamientos E100 y E80 cuentan con los niveles de sodio más altos debido a que los contenidos de sodio de ATAEP son más altos que los del agua natural (N100-N80). Sin embargo, este contenido de sodio en ATAEP se considera bajo (95 mg.l en promedio), teniendo en cuenta que el límite permisible de la norma de reúso (Resolución 1207) es de 200 mg.l<sup>-1</sup>. Adicionalmente, en los tratamientos en donde se regó con agua normal el contenido de sodio se clasifica como bajo y muy bajo.

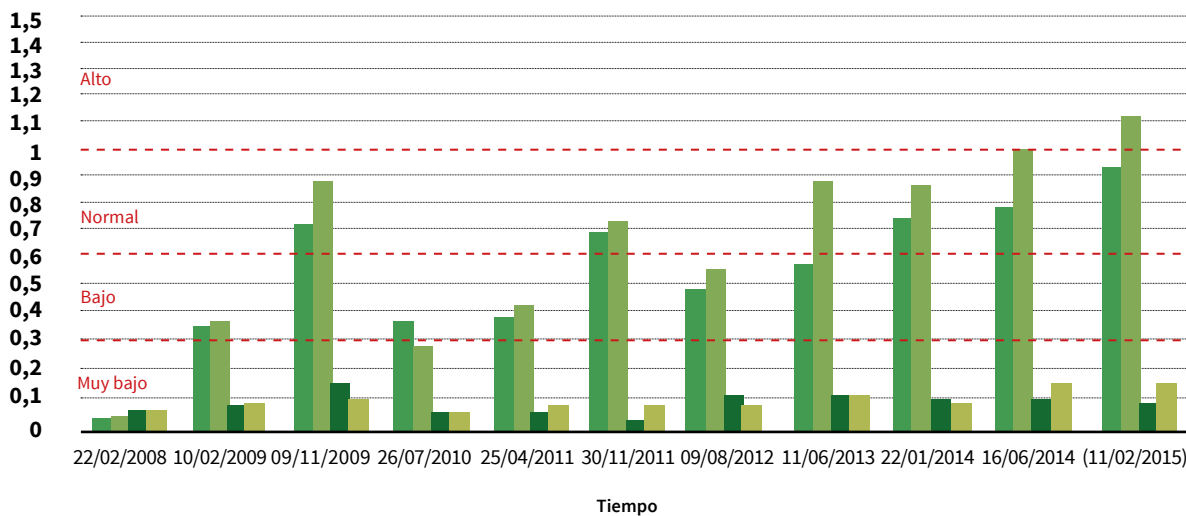
Contenido de sodio (cmol.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



Investigación bajo condiciones controladas en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

- E 100 ●
- E 80 ●
- N 100 ●
- N 80 ●

Contenido de sodio (cmol.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros sin cultivo - Castilla La Nueva



←  
**Figura 9.** Comportamiento del contenido de sodio (cmol.kg<sup>-1</sup>) en Castilla La Nueva

## Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CEs) ha sido el parámetro más extendido y el más ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución, y se expresa en dS.m<sup>-1</sup> (dS=deciSiemens). Por tanto, la CEs refleja la concentración de sales solubles en la disolución.

Para distinguir suelos salinos de no salinos, se han sugerido varios límites arbitrarios de salinidad. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de 2 dS.m<sup>-1</sup> como límite para el carácter salino a nivel de gran grupo y subgrupo, pues considera que a partir de ese valor las propiedades morfológicas y fisicoquímicas del perfil (y por tanto la génesis) quedan fuertemente influenciadas por

el carácter salino. El laboratorio de salinidad de los EE. UU., por su parte, ha establecido el límite de 4 dS.m<sup>-1</sup> para que la salinidad comience a ser tóxica para las plantas (punto de vista, pues, aplicado).

Con base en la CEs, el United States Salinity Laboratory de Riverside establece los siguientes grados de salinidad:

- 0-2** Suelos normales.
- 2-4** Quedan afectados los rendimientos de los cultivos muy sensibles. Suelos ligeramente salinos.
- 4-8** Quedan afectados los rendimientos de la mayoría de los cultivos. Suelos salinos.
- 8-16** Solo se obtienen rendimientos aceptables en los cultivos tolerantes. Suelos fuertemente salinos.
- > 16** Muy pocos cultivos dan rendimientos aceptables. Suelos extremadamente salinos.



**Tabla 9.**

Resultados del análisis estadístico efectuado al valor de la conductividad eléctrica en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

En la tabla 9 se presenta el resultado del análisis estadístico multitemporal realizado a la conductividad eléctrica del suelo en las dos localidades.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Conductividad eléctrica (dS.m <sup>-1</sup> )			
	Media	Media	Media	Media
E100	0,48 a	0,72 a	0,87 a	2,93 a
E80	0,54 a	0,73 a	1,12 a	2,59 a
N100	0,09 d	0,20 b	0,34 b	0,46 b
N80	0,13 c	0,16 b	0,35 b	0,59 b

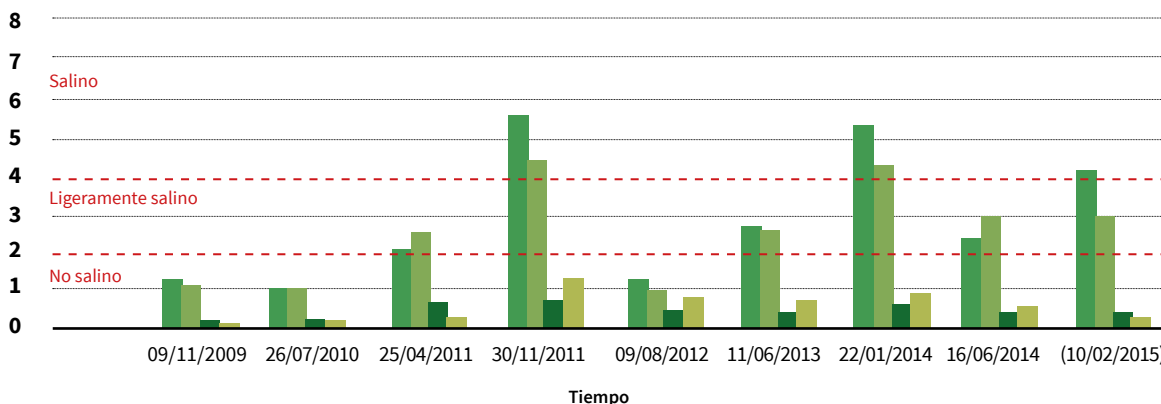
\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

En el CI La Libertad y en Castilla La Nueva se encontró diferencia significativa en la conductividad eléctrica para los tratamientos con diferentes calidades de agua. En estos se registraron valores por debajo de 2 dS.m<sup>-1</sup>, que según la clasificación del United States Salinity Laboratory de Riverside corresponden a “suelos normales”, excepto para la localidad de Castilla La Nueva en lisímetros con cultivo y con tratamientos de riego con base en ATAEP, los cuales se clasificaron como “suelos moderadamente salinos” (2-4 dS.m<sup>-1</sup>). En la figura 10 se presenta la variación temporal de la

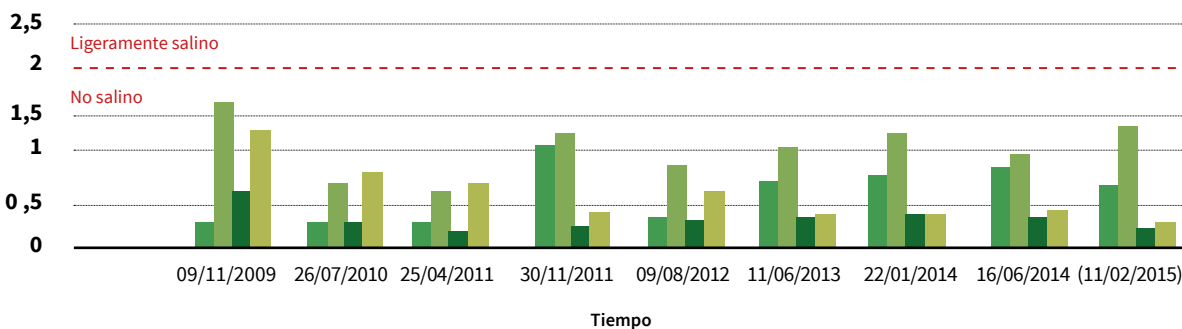
conductividad eléctrica para todos los tratamientos en las dos localidades. En el CI La Libertad, para las épocas de muestreo consideradas y todos los tratamientos de riego y cobertura, la conductividad eléctrica se mantuvo en la clasificación de suelo normal. Por su parte, en Castilla La Nueva, el tratamiento de suelo con cultivo y riego con ATAEP ha presentado clasificación de conductividad eléctrica oscilante entre suelos salinos y ligeramente salinos. En los tratamientos sin cultivo, la CE se ha clasificado como suelo normal en todos los tiempos y tratamientos de riego considerados.

- E 100
- E 80
- N 100
- N 80

Conductividad eléctrica (dS.m<sup>-1</sup>) en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



Conductividad eléctrica (dS.m<sup>-1</sup>) en lisímetros sin cultivo - Castilla La Nueva



**Figura 10.**

Conductividad eléctrica (dS.m<sup>-1</sup>) en suelo en Castilla La Nueva

## pH

Las letras pH son una abreviatura del potencial de hidrógeno, definido como el logaritmo cambiado de signo de la actividad de los iones hidrógeno en una solución. Este parámetro, cuyos valores en los suelos pueden variar ampliamente, es crítico por la influencia que ejerce sobre la dinámica de los nutrientes que han de ser absorbidos por las plantas; particularmente, valores extremos de pH pueden provocar la precipitación de ciertos nutrientes, con lo que permanecen en forma no disponible para las plantas, de manera que estos niveles deben ser corregidos (los valores normales están entre 5 y 7 para zonas húmedas). Asimismo, el pH influye en gran medida en el desarrollo de los cultivos determinando el desarrollo de los microorganismos, la velocidad de los procesos de humificación y de mineralización, y la capacidad de adsorción de cationes en el complejo de cambio.

Los distintos cultivos muestran distinta adaptabilidad para su desarrollo en función del pH del suelo. Existen especies más acidófilas que otras, y cada una presenta un rango de pH del suelo ideal para su crecimiento. En cualquier caso, el crecimiento y el funcionamiento radicular pueden ser directamente afectados por un pH de 5 e inferiores, dependiendo de la especie considerada. Entre pH 5 y 8, el crecimiento suele ser satisfactorio, pero a pH 9 pueden darse efectos directos del OH<sup>-</sup> o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sobre la absorción de fósforo, hierro, molibdeno y otros.

Los siguientes son los valores utilizados en la clasificación del pH:

**3** Representa pH extremo en suelos turbosos.

**5 - 7** Valores frecuentes de pH en suelos minerales de regiones húmedas.

**7 - 9** Valores frecuentes de pH en suelos minerales de regiones áridas.

**11** Valores para suelos alcalinos minerales, sodio de adsorción.

La cantidad de hierro, aluminio y manganeso soluble en muchos suelos aumenta con la acidez. Tanto el hierro como el aluminio forman compuestos de baja solubilidad con los fosfatos. En los suelos de pH 5 hacia abajo los fosfatos de hierro y aluminio se pueden formar, pero su baja solubilidad no proporciona fósforo a las plantas. El pH de las soluciones entre 4 y 9 no tiene una influencia marcada sobre la absorción de iones, y solo a pH menores de 4 se presentan trastornos en el desarrollo de raíces, mientras que a pH mayores de 9 se produce una absorción deficiente de fosfatos.

Los suelos solo llegan a ser ácidos cuando el abastecimiento de iones básicos, principalmente calcio en el complejo coloidal, llega a ser agotado, y es entonces cuando hay principio para opinar que la deficiencia de calcio es una de las causas de restricción en el desarrollo de muchas plantas en suelos altamente ácidos.

Los suelos con pH ácido son desfavorables para el desarrollo radicular, suelen ser pobres en bases de cambio (Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>), y en ellos se reduce la actividad microbiana, al tiempo que disminuye la asimilación del fósforo, el cual se precipita y da formas insolubles con el manganeso, el aluminio y el hierro.

Por otra parte, cuando la acumulación de sales afecta la productividad del suelo, se le denomina suelo salino. El pH en este caso puede variar de 7,0 a 8,5.

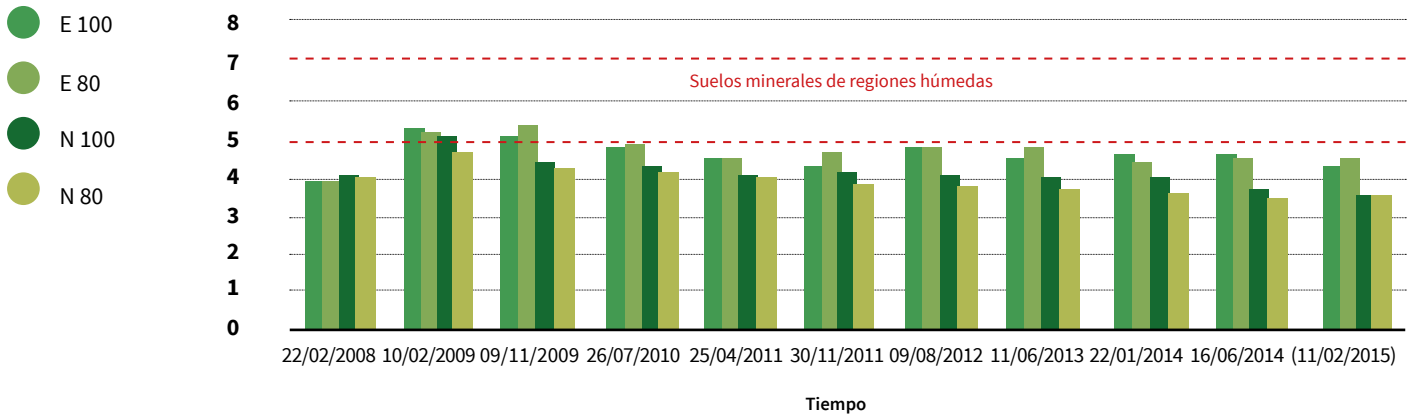
Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Conductividad eléctrica (dS.m <sup>-1</sup> )			
	Media	Media	Media	Media
E100	6,66 a	6,65 a	4,96 a	4,94 a
E80	6,53 b	6,47 a	5,19 a	5,00 a
N100	5,29 c	4,75 b	4,44 b	4,41 b
N80	5,07 d	4,67 b	4,49 b	4,16 c

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

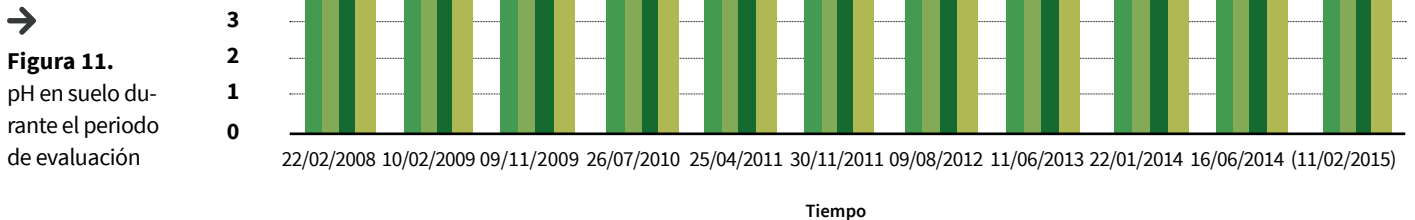


**Tabla 10.** Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del pH del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

## Comportamiento del pH en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



## Comportamiento del pH en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



→  
**Figura 11.**  
pH en suelo durante el periodo de evaluación

El comportamiento del pH en los suelos de las dos localidades consideradas mostró cambios estadísticamente significativos por la aplicación de los tratamientos de calidad de agua (tabla 10). Los suelos de Castilla La Nueva se conservan más ácidos en comparación con los suelos del CI La Libertad.

En la figura 11 se presenta el comportamiento temporal del pH durante el periodo de la evaluación. En el CI La Libertad, los mayores cambios en este parámetro se manifiestan en condiciones de lisímetros con cultivo, si bien en todos los casos los registros se encuentran en el rango normal para suelos minerales de región húmeda.

### Metales pesados

Los metales pesados, y en general los elementos traza, están presentes en relativamente bajas concentraciones ( $< \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) en la corteza terrestre, los suelos y

las plantas. La presencia de concentraciones nocivas (anomalías) en los suelos es una degradación especial denominada contaminación.

El elemento traza en los suelos puede ser de origen geogénico o antropogénico. Los de origen geogénico proceden de la roca madre, de actividad volcánica o de la lixiviación de mineralizaciones, mientras que los metales pesados antropogénicos derivan de residuos peligrosos, procedentes de actividades industriales, minería e industria agrícola, y residuos sólidos urbanos (RSU). Legalmente, se entiende por contaminación la producida por estos contaminantes.

Sostenibilidad y calidad del suelo son dos conceptos que deben ir juntos. Según este argumento, los fenómenos de contaminación de suelos son importantes precisamente por incidir directamente en lo indicado con anterioridad.

La acción de los metales pesados sobre el suelo, y por tanto el nivel de peligrosidad de este tipo de contaminantes, dependerá (además de su concentración) de las condiciones del suelo (pH, contenido en carbonatos, materia orgánica...) y del propio metal. En función de dichas condiciones se podrán dar diferentes procesos (adsorción, desorción, complejación), los cuales influirán sobre la biodisponibilidad de dicho metal. Tal "biodisponibilidad" es la que marca la peligrosidad de la contaminación metálica en suelos, la cual puede producirse:

- A** De forma directa: efecto del metal o metales sobre la actividad microbiana del suelo.
- B** De forma indirecta: afectando a las plantas que crecen en el suelo, las cuales pueden ver inhibido su desarrollo, o bien sin experimentar alteraciones fisiológicas y absorbiendo el metal, el cual pasa a la cadena trófica.

Tampoco es descartable un efecto colateral y problemático de la contaminación metálica, como es la posible lixiviación de algún metal, lo que puede dar lugar entonces a contaminación sobre aguas subterráneas.

Para la comparación 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 Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health*). En la tabla 11 se presenta un resumen de esta guía con los indicadores seleccionados para esta investigación.



**Tabla 11.** Límites permisibles en suelos (mg.kg<sup>-1</sup>) de sustancias peligrosas según la norma canadiense (2007)

Substancia	Año de revisión	mg.kg <sup>-1</sup>
Bario	2003	760
Cadmio	1999	1,4
Cromo	1997	64
Plomo	1999	70

En la tabla 12, por otro lado, se presenta el resultado del análisis estadístico realizado a estas sustancias presentes en los suelos en donde se aplicaron los diferentes tratamientos de agua. Al comparar estos valores con los de la guía canadiense (tabla 11), se ve claramente que los niveles máximos permisibles de las sustancias catalogadas peligrosas se encuentran muy alejados de los valores reales encontrados en esta investigación.

Metales pesados - Castilla La Nueva								
Tratamiento	Sin cultivo (mg.kg <sup>-1</sup> )				Con cultivo (mg.kg <sup>-1</sup> )			
	Cadmio	Cromo	Plomo	Bario	Cadmio	Cromo	Plomo	Bario
	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
E100	0,05 a	28,16 a	6,41 a	70,74 a	0,07 a	30,86 a	6,54 a	96,28 a
E80	0,05 a	26,92 a	6,18 ab	54,98 ab	0,07 a	30,26 a	6,41 a	75,37 a
N100	0,05 a	26,00 a	5,88 ab	28,33 b	0,07 a	27,71 a	6,41 a	49,11 a
N80	0,05 a	25,49 a	5,70 b	28,03 b	0,07 a	27,45 a	6,29 a	33,58 a

Metales pesados - CI La Libertad								
Tratamiento	Sin cultivo (mg.kg <sup>-1</sup> )				Con cultivo (mg.kg <sup>-1</sup> )			
	Cadmio	Cromo	Plomo	Bario	Cadmio	Cromo	Plomo	Bario
	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media
E100	0,05 a	25,75 a	6,14 a	53,79 a	0,18 a	25,87 a	6,71 a	56,98 a
E80	0,05 a	25,50 a	5,88 a	33,48 ab	0,17 a	25,15 a	6,39 a	52,34 a
N100	0,05 a	24,41 a	5,80 a	21,96 b	0,12 a	24,70 a	6,34 a	22,84 b
N80	0,05 a	22,83 a	5,42 a	20,02 b	0,10 a	23,71 a	6,26 a	21,43 b



**Tabla 12.** Resultados del análisis estadístico efectuado a los valores de metales pesados y bario del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

## Bario

El bario es un metal que, si bien no se encuentra libre en la naturaleza, puede hallarse en el medioambiente, donde existe de forma natural en combinación con otros elementos químicos como el azufre, el carbón o el oxígeno. También se presenta como un elemento traza en rocas ígneas y sedimentarias. Su sal más común es el sulfato de bario (barita), y la menos común es el carbonato de bario.

La concentración de bario en suelos varía entre 20 y 3.000 mg.kg<sup>-1</sup>, señalándose un valor medio en torno

a 500 mg.kg<sup>-1</sup>. La fracción biodisponible es generalmente baja, sobre todo en medios de pH neutro a básico, mientras que la biodisponibilidad aumenta en medios ácidos, desaturados, con bajos niveles de sulfatos, fosfatos y materia orgánica y textura arenosa a franco arenosa (Macías y Calvo, 2009).

Para el caso de la investigación realizada en los lisímetros, se observa en la tabla 13 una diferencia significativa en los contenidos de este elemento en la localidad del CI La Libertad para los tratamientos de riego con ATAEP. En el tiempo (figura 12), no se observan incrementos de este elemento.



**Tabla 13.**

Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del bario del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

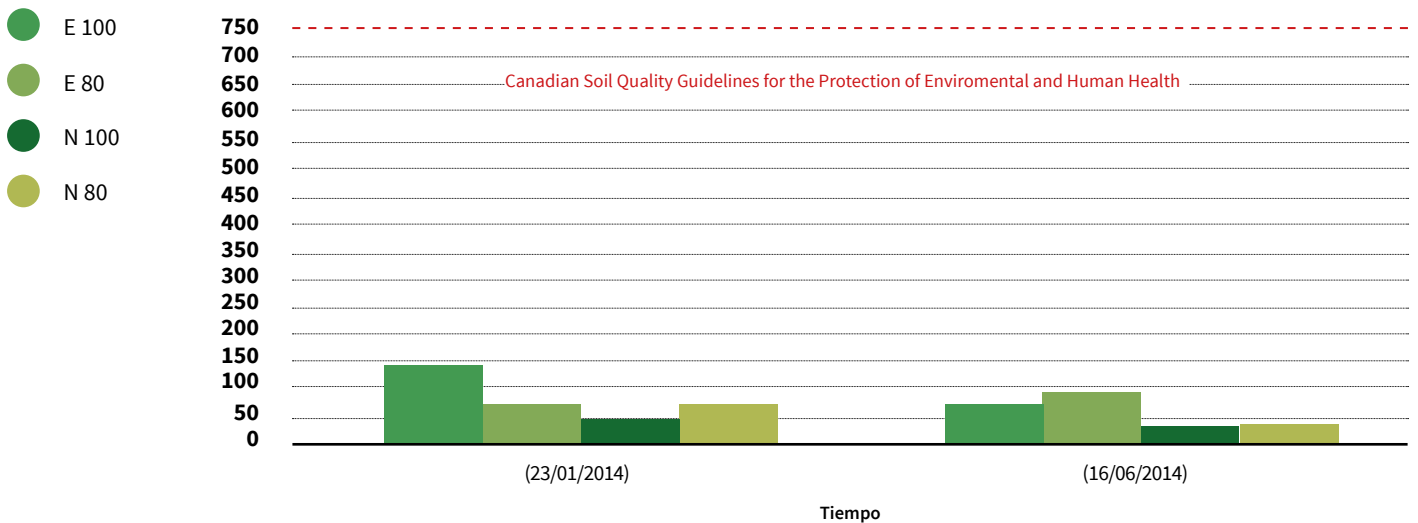
Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Bario (mg.kg <sup>-1</sup> )			
	Media	Media	Media	Media
E100	53,79 a	56,98 a	70,74 a	96,28 a
E80	33,48 ab	52,34 a	54,98 ab	75,37 a
N100	20,02 b	21,43 b	28,33 b	33,58 a
N80	21,96 b	22,84 b	28,03 b	49,11 a

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

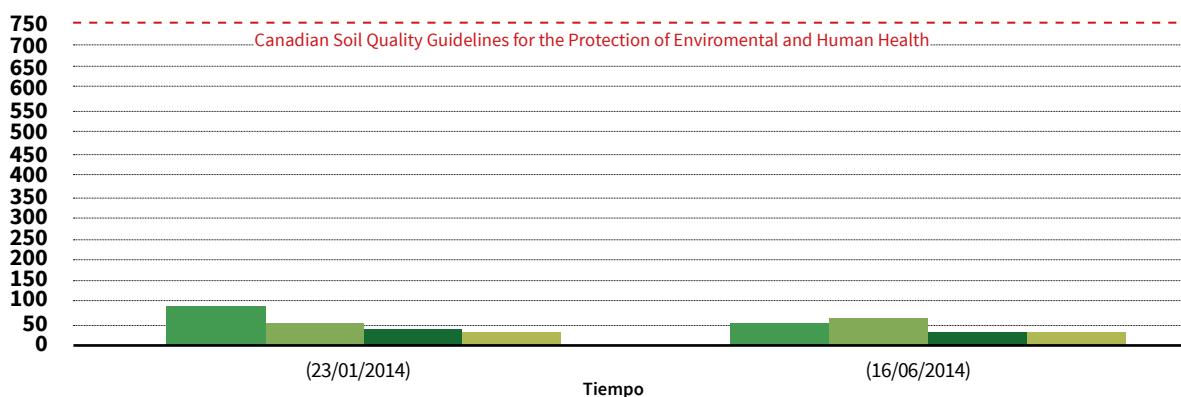
Según la normatividad ambiental de Canadá, el nivel crítico de este elemento en el suelo es de 760 mg.kg<sup>-1</sup>, y los valores máximos registrados en esta investigación fueron de 96,2 mg.kg<sup>-1</sup>, en la localidad

de Castilla La Nueva: en todo caso, valores por debajo del contenido medio normal de este elemento en suelos agrícolas (500 mg.kg<sup>-1</sup>).

Contenido de bario (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



Contenido de bario (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros sin cultivos - Castilla La Nueva



Investigación  
bajo condiciones  
controladas en el  
CI La Libertad y en  
Castilla La Nueva



Figura 12.

Comportamiento del contenido de bario (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros en Castilla La Nueva

## Plomo

El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11,4 a 16 °C —61 °F—), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad, (327,4 °C) y hierve a 1.725 °C. Las valencias químicas normales son 2 y 4. Es relativamente resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico y se disuelve con lentitud en ácido nítrico. El plomo es anfótero ya que forma sales de plomo de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico. Es un elemento, que en definitiva, forma muchas sales, óxidos y compuestos orgánicos metálicos.

Las fuentes naturales de este elemento son la erosión del suelo, el desgaste de los depósitos de los minerales de plomo y las emanaciones volcánicas. La galena es la principal fuente de producción y se encuentra generalmente asociada con diversos minerales, zinc y en pequeñas cantidades con el cobre, el cadmio, el hierro, etc.

Cuando el plomo se libera al ambiente tiene un largo tiempo de residencia en comparación con la mayoría de los contaminantes. Como resultado, tiende a acumularse en tierra y sedimentos, donde, debido a su baja solubilidad, puede permanecer accesible a la cadena alimentaria y al metabolismo humano por mucho tiempo.

El contenido de plomo en suelos oscila normalmente entre 3-189 mg.kg<sup>-1</sup>, con un valor medio en torno a 30 mg.kg<sup>-1</sup>. La contaminación difusa es general en todos los suelos del mundo, de manera que, exceptuando regiones particularmente aisladas, el fondo edafogeoquímico aparece siempre incrementado respecto al contenido litológico natural, sobre todo en áreas de elevada densidad de tráfico (Macías y Calvo, 2009).

En la tabla 14 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a los registros obtenidos durante la investigación relacionados con el contenido de plomo en el suelo. Por otro lado, la figura 13 muestra el comportamiento temporal de este elemento durante el estudio en las dos localidades.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Plomo (mg.kg <sup>-1</sup> )			
	Media	Media	Media	Media
E100	5,42 a	6,34 a	5,88 ab	6,41 a
E80	5,80 a	6,39 a	6,18 ab	6,41 a
N100	5,88 a	6,71 a	5,70 b	6,54 a
N80	6,14 a	6,26 a	6,41 b	6,29 a

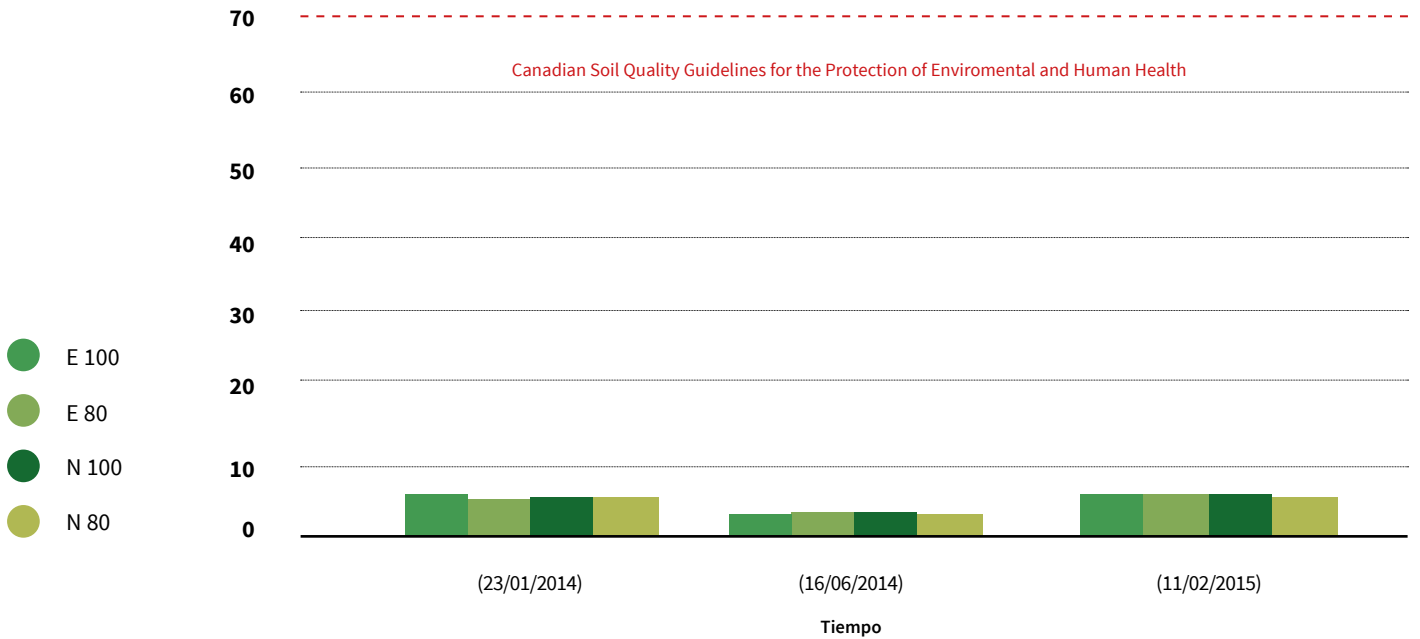


Tabla 14.

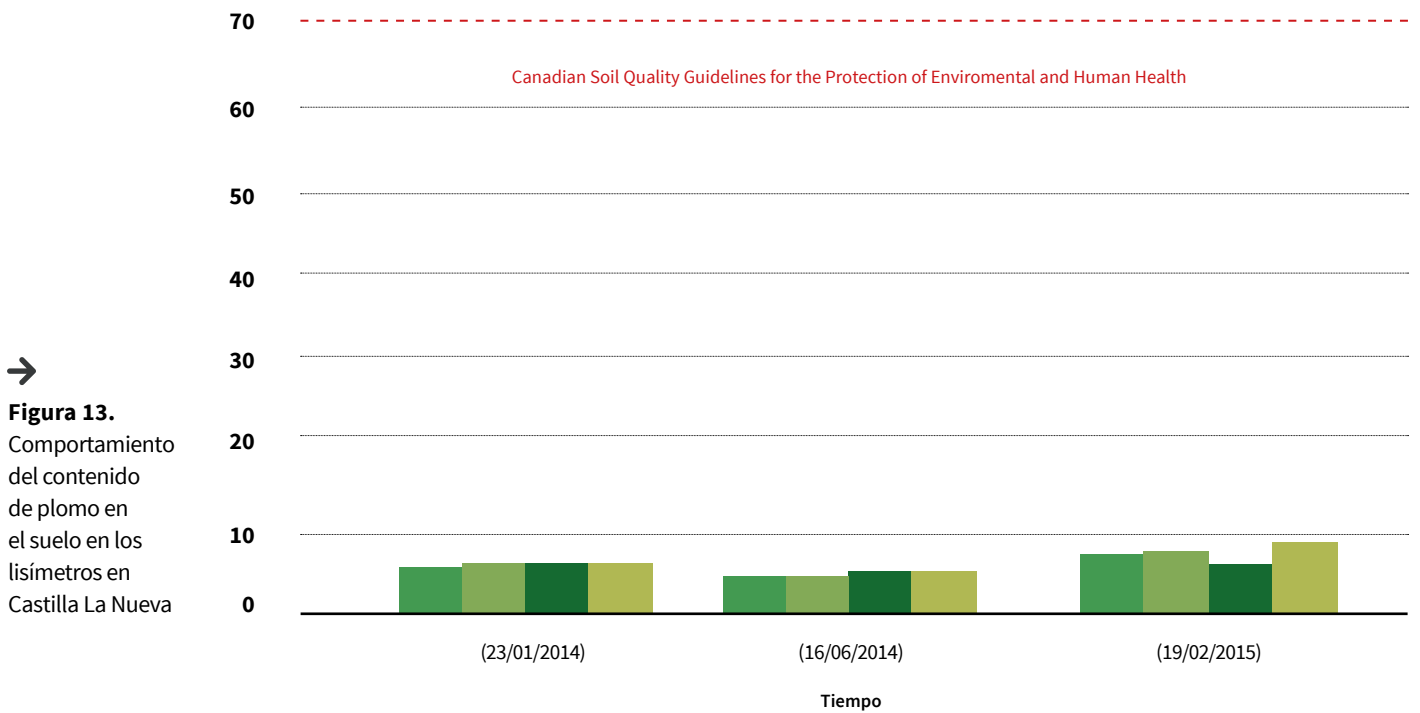
Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del plomo del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Contenido de plomo (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



Contenido de plomo (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros sin cultivos - Castilla La Nueva



→ **Figura 13.** Comportamiento del contenido de plomo en el suelo en los lisímetros en Castilla La Nueva

En este trabajo de investigación se encontró que este parámetro de evaluación de la calidad del suelo está muy por debajo de los niveles críticos establecidos por la norma canadiense (70 mg.kg<sup>-1</sup>). El valor más alto registrado fue para el tratamiento con cultivo y riego con agua normal en el CI La Libertad (6,71 mg.kg<sup>-1</sup>) (a nivel mundial el conte-

nido normal de plomo en suelos es alrededor de 30 mg.kg<sup>-1</sup>). En general, estadísticamente no se encontraron diferencias significativas de la presencia de este elemento atribuibles a los tratamientos considerados, y respecto a la variabilidad temporal de plomo en los diferentes tratamientos, tampoco se observan cambios marcados.

## Cromo

El cromo es un elemento natural que se encuentra en rocas, plantas, suelos y animales y en los humus y gases volcánicos. Es un metal de transición duro, frágil, gris acerado y brillante, muy resistente frente a la corrosión. Puede funcionar con distintas valencias, y en el ambiente se halla en varias formas; las más comunes son las derivadas del cromo trivalente o cromo III y las cromo hexavalente o cromo VI. El cromo hexavalente se encuentra muy frecuentemente en naturaleza como  $Cr_2O_4Fe$ , constituyendo la peridotita y la serpentina, de las que se deriva. Es un agente cancerígeno de las vías respiratorias. Los cultivos contienen sistemas para gestionar la

toma de cromo con el fin de que esta sea lo suficientemente baja como para no causar cáncer. No obstante, cuando la cantidad de cromo en el suelo aumenta, también pueden incrementarse las concentraciones en los cultivos. La acidificación del suelo puede también influir en esta captación. Como resultado de un trabajo de investigación realizado por la FAO, se encontró que el cromo se fija y se acumula irreversiblemente en el suelo. Por ello, el exceso de lo requerido por las plantas eventualmente llega a contaminar los suelos.

En la tabla 15 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado a este parámetro para los suelos tratados en el marco de la presente investigación.

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Plomo ( $mg \cdot kg^{-1}$ )			
	Media	Media	Media	Media
E100	22,83 a	25,15 a	26,00 a	30,86 a
E80	24,41 a	24,70 a	26,92 a	27,45 a
N100	25,75 a	25,87 a	25,49 a	30,26 a
N80	25,50 a	23,71 a	28,16 a	27,71 a

←  
**Tabla 15.**  
Resultados del análisis estadístico efectuado al valor del cromo del suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).  
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

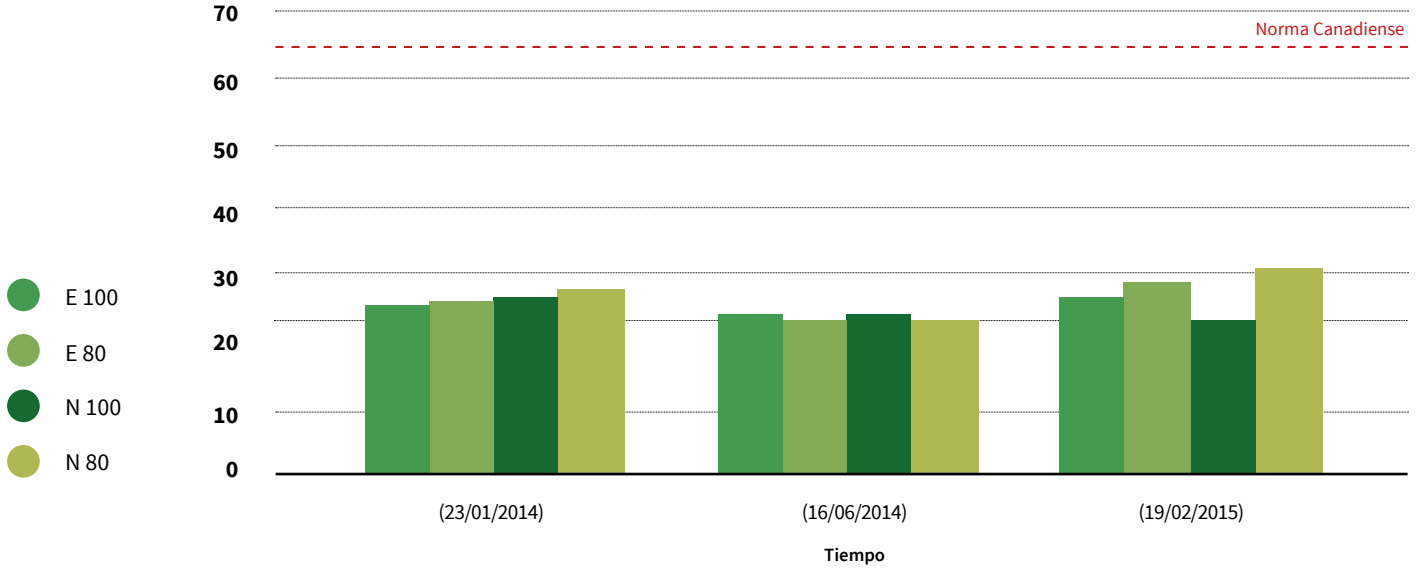
Como se observa, en las dos localidades no se presentan diferencias en el contenido de cromo en el suelo de los diferentes lisímetros sometidos a los tratamientos de agua.

Según Sierra (2007), el fondo geoquímico del cromo o herencia de la roca madre de las rocas ácidas está entre los niveles de 4 y  $25 mg \cdot kg^{-1}$ , valor similar al encontrado por esta investigación para los suelos estudiados (oxisoles de la Orinoquia colombiana). Asimismo, los

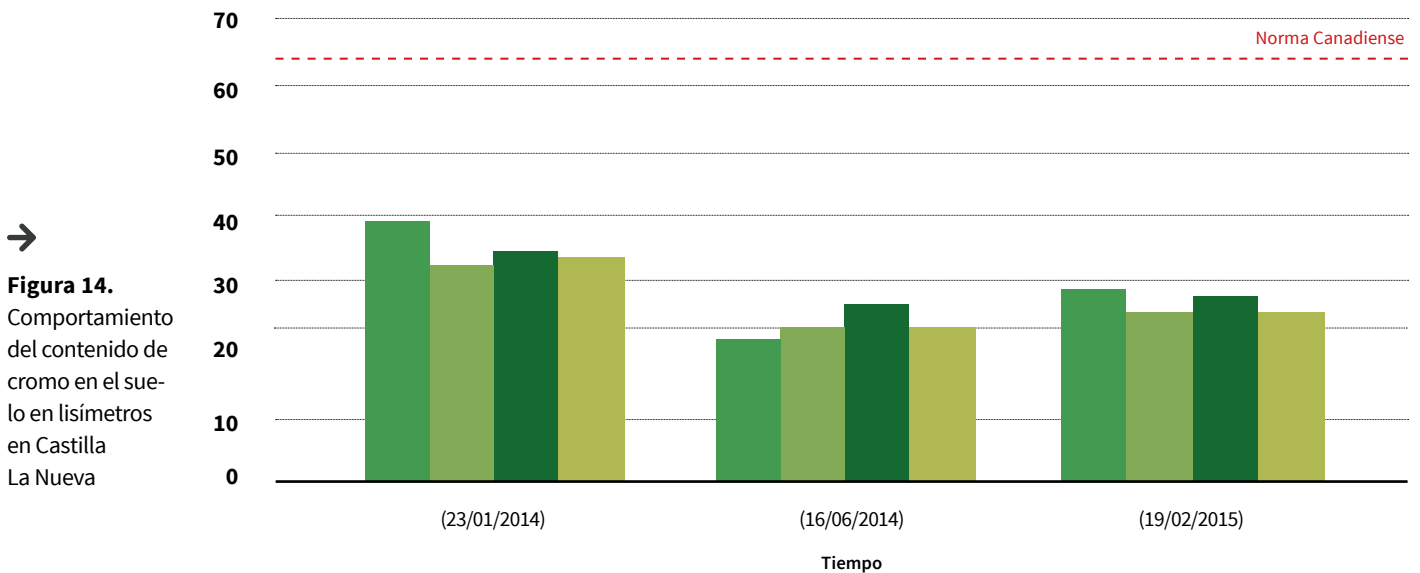
valores hallados se presentan por debajo del nivel crítico de afectación de este elemento para suelos agrícolas reportados por la norma canadiense ( $64 mg \cdot kg^{-1}$ ).

En la figura 14 se presenta el comportamiento temporal del contenido de cromo edáfico en las dos localidades y para todos los tratamientos estudiados. En este sentido no se observaron cambios, y en todos los casos los niveles de cromo encontrados corresponden a los valores normales para este tipo de suelos.

Contenido de cromo (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros sin cultivos - Castilla La Nueva



Contenido de cromo (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros con cultivo - Castilla La Nueva



→ **Figura 14.** Comportamiento del contenido de cromo en el suelo en lisímetros en Castilla La Nueva

### Cadmio

El cadmio es un metal blanco plateado dúctil y maleable que no se encuentra nativo. Es insoluble en bases, se disuelve en ácido nítrico diluido, y es poco soluble en los ácidos sulfúricos y clorhídricos. Se encuentra en partes específicas del mundo, como un subproducto de la extracción del zinc, y se usa principalmente en la fabricación de soldaduras, aleaciones, revestimientos metálicos y minerales plásticos.

La contaminación con este elemento reduce el rendimiento de algunas plantas. Por ejemplo, al producirse un aumento en los niveles de cadmio en los suelos de 50 ppm, se ha observado que el ren-

dimiento del trigo declina en un 25%, y se han registrado pérdidas aún mayores en la productividad cuando el nivel de cadmio aumentó. Según Sierra (2005), la herencia de la roca madre o fondo geoquímico de las rocas ácidas se presenta en el rango de contenido entre 0,09 y 0,20 mg.kg<sup>-1</sup> de suelo.

En la tabla 16 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado a este elemento, mientras que en la figura 15 se observa su comportamiento temporal. Nótese que no se presentan diferencias significativas debidas a los tratamientos, con niveles un poco por debajo del rango propuesto por Sierra (2005) y muy por debajo de los niveles críticos considerados por la norma canadiense (1,4 mg.kg<sup>-1</sup>).

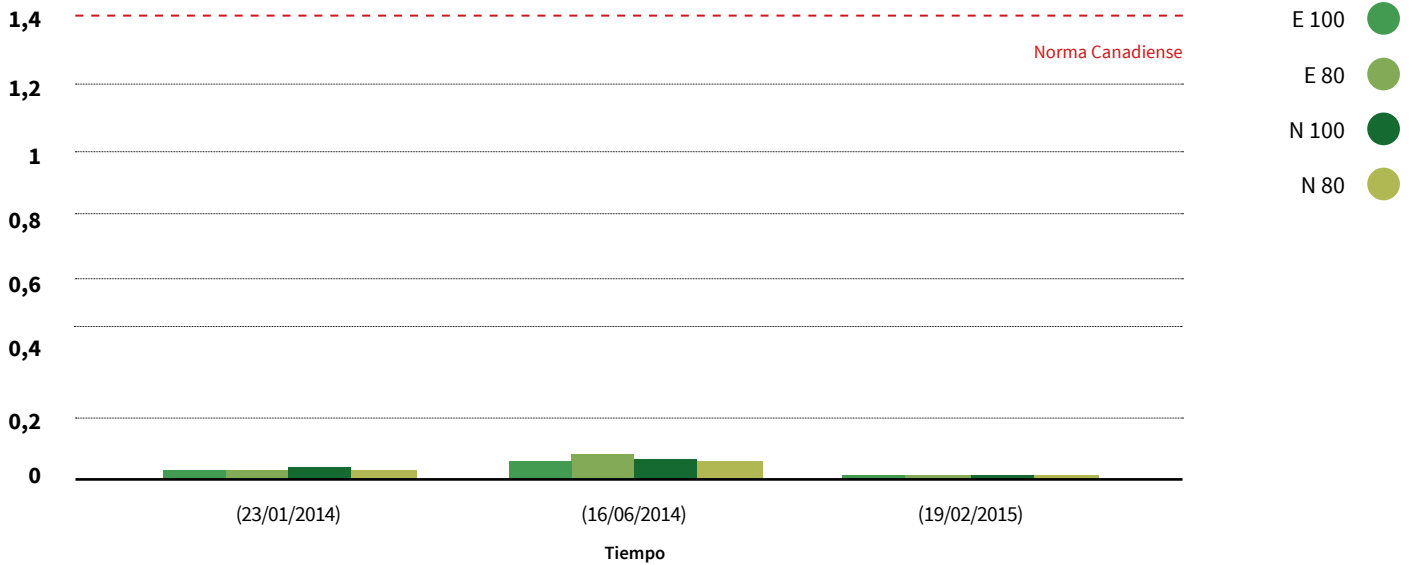


**Tabla 16.**  
Resultados del  
análisis estadís-  
tico efectuado al  
valor del cadmio  
del suelo en el CI  
La Libertad y en  
Castilla La Nueva

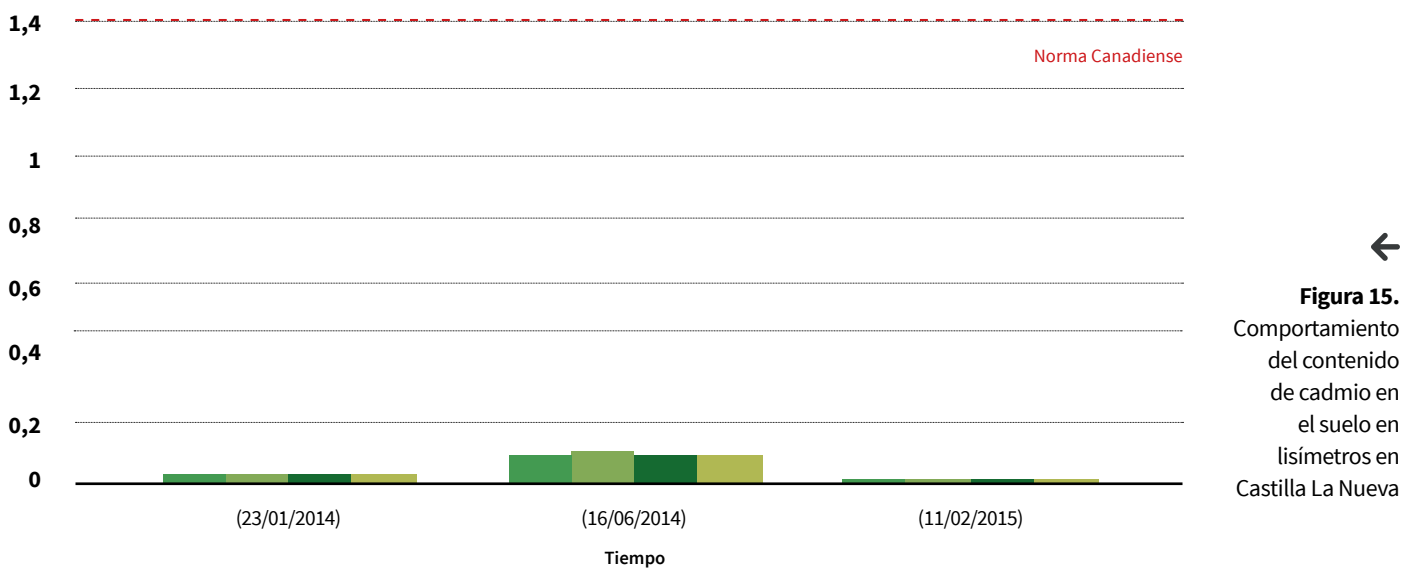
Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Cadmio (mg.kg <sup>-1</sup> )			
	Media	Media	Media	Media
E100	0,05 a	0,18 a	0,05 a	0,07 a
E80	0,05 a	0,17 a	0,05 a	0,07 a
N100	0,05 a	0,12 a	0,05 a	0,07 a
N80	0,05 a	0,10 a	0,05 a	0,07 a

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).  
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Contenido de cadmio (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros sin cultivos - Castilla La Nueva



Contenido de cadmio (mg.kg<sup>-1</sup>) en lisímetros con cultivos - Castilla La Nueva



**Figura 15.**  
Comportamiento  
del contenido  
de cadmio en  
el suelo en  
lisímetros en  
Castilla La Nueva

## Análisis microbiológico del suelo

Los microorganismos son los componentes más importantes del suelo. Constituyen su parte viva y son los responsables de la dinámica de transformación y desarrollo de la fracción mineral. La mayor actividad de los microorganismos se realiza desde la superficie del suelo hasta unos 20 cm de profundidad. Las colonias de microorganismos permanecen adheridas a las partículas de arcilla y humus (fracción colonial) y a las raíces de las plantas, las cuales les suministran sustancias orgánicas que les sirven de alimentos y estimulan su reproducción (Delgado, s.f.).

La microflora del suelo está compuesta por bacterias, actinomicetos, hongos, algas, virus y protozoarios. Entre las funciones más importantes que cumplen asociadamente en los procesos de transformación están:

- Suministro directo de nutrientes (fijación de nitrógeno).
- Transformación de compuestos orgánicos que la planta no puede tomar directamente a formas inorgánicas que sí pueden ser asimiladas.
- Solubilización de compuestos inorgánicos para facilitar la absorción por las plantas. Cambios químicos en compuestos inorgánicos debidos a procesos de oxidación y reducción.
- Aumento del desarrollo radicular en la planta, que mejora la asimilación de nutrientes, la capacidad de campo y el desarrollo.
- Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo (Córdoba y Tabasco, 2013).

A continuación se hace una descripción del comportamiento encontrado de las bacterias, los actinomicetos y los hongos en la investigación según el tratamiento, la cobertura y la localidad.

### Bacterias

Las bacterias son uno de los grupos de los microorganismos del suelo clave en la transformación de la materia mineral y orgánica del suelo que contribuye a su fertilidad. Estas tienen una amplia diversidad bioquímica, y por ello son las más abundantes de los microorganismos del suelo. Ahora, si bien su número es grande, por su tamaño representan menos de la mitad de la masa celular microbiana total. Las bacterias en un suelo con oxígeno son dominantes y responsables de las transformaciones de la materia orgánica ya que crecen rápidamente y mineralizan una amplia gama de compuestos orgánicos naturales.

En un suelo, la población bacteriana nativa incluye géneros que crecen al agregar nutrientes de carbono orgánico sencillo, mientras que aquellas de alta actividad de mineralización requieren nutrientes que se consumen rápidamente porque responden de inmediato a compuestos de fácil degradación, la cual disminuye cuando se agota la fuente alimenticia. Según Osorio (2012), la cantidad adecuada de bacterias en el suelo para suelos ácidos (oxisoles) se ha establecido en  $54 \times 10^6$  UFC.g<sup>-1</sup> de suelo.

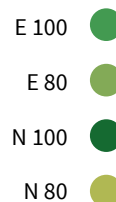
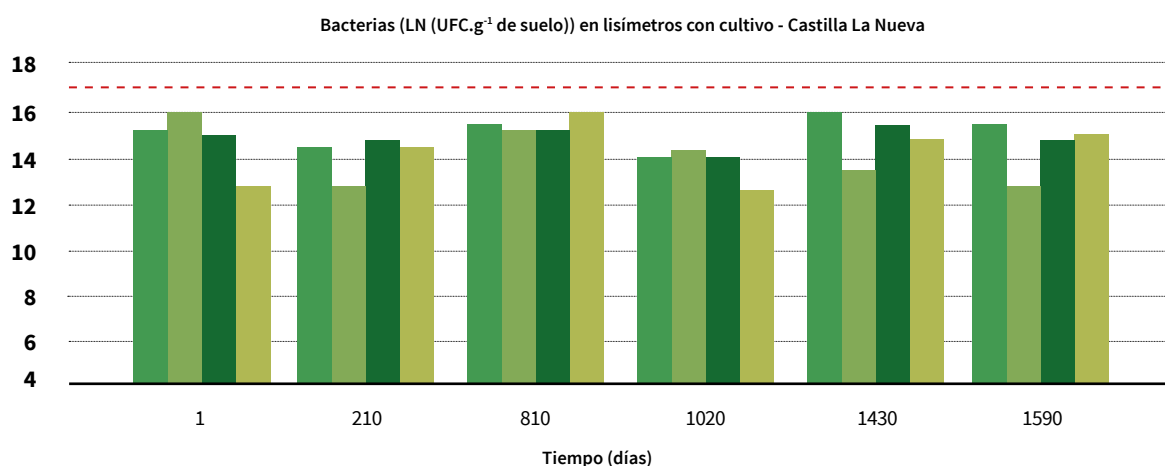
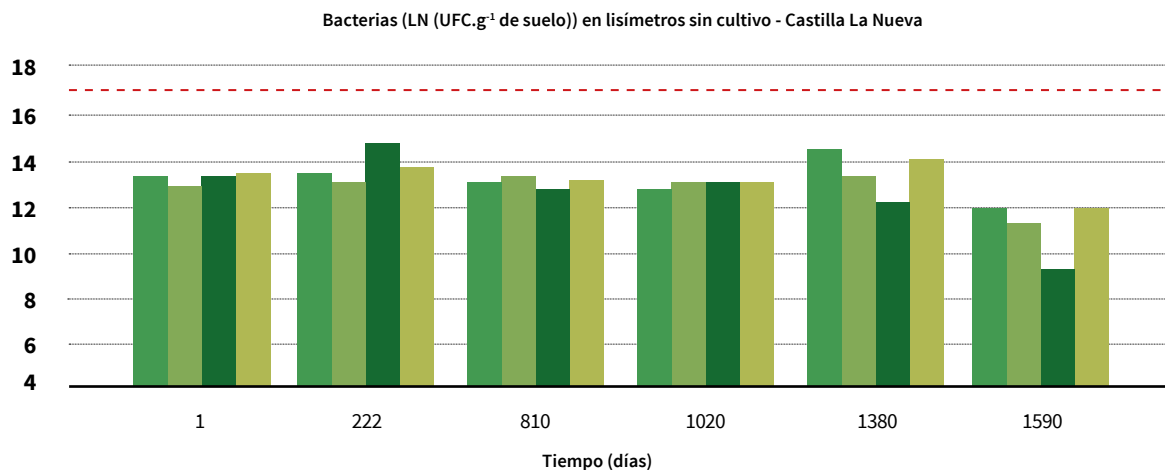
En la tabla 17 se presentan los resultados del análisis estadístico efectuado a la información consignada en el conteo de unidades formadoras de colonias de bacterias (UFC) por gramo de suelo durante el desarrollo de la investigación.



**Tabla 17.** Resultados del análisis estadístico efectuado a la cantidad de bacterias en el suelo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	(LN (UFC.g <sup>-1</sup> de suelo))			
	Media	Media	Media	Media
E100	15,23 a	15,43 a	13,37 a	13,92 b
E80	14,44 b	14,79 a	13,01 a	15,38 a
N100	14,39 b	15,28 a	12,71 a	13,99 b
N80	13,93 c	14,90 a	13,43 a	14,34 ab

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. LN: logaritmo natural.



←  
**Figura 16.**  
Comportamiento  
de las bacterias  
del suelo en Cas-  
tilla La Nueva

En la figura 16 se presenta el resultado de la variación temporal por tratamiento del conteo de bacterias en las dos localidades y en condiciones de cultivo y sin cultivo. Los valores más altos en el conteo de bacterias corresponden a los tratamientos en donde se establecieron cultivos en las dos localidades. No es claro el efecto de los tratamientos de agua de riego en el conteo de las bacterias del suelo.

Los contenidos de bacterias registrados en este trabajo se presentan un poco por debajo del valor reportado como normal por Osorio (2012) para los suelos ácidos, es decir,  $54 \times 10^6$  UFC.g<sup>-1</sup> de suelo. Analizando la figura 16, se observa que la población de bacterias en los lisímetros de las dos localidades no refleja variabilidad notoria a través del tiempo en el número de unidades formadoras de colonias (UFC (LN)) con relación al efecto de los tratamientos e igualmente con relación a la cobertura (con y sin cobertura). Sin embargo, todos los resultados se presentan cerca del rango óptimo de poblaciones para este tipo de suelos.

## Actinomicetos

Dentro de la gran variedad de microorganismos habitantes del suelo se encuentran los actinomicetos: microorganismos heterótrofos, aerobios y poco tolerantes a la acidez, por lo que crecen de forma óptima en un pH cercano a la neutralidad, si bien pueden desarrollarse en un rango de pH entre 5,0 y 9,0. En consecuencia, solo se encuentran en raras ocasiones en suelos con un pH inferior a 5,0, al igual que en suelos con una alta humedad entre el 85-100% de capacidad de campo, en comparación con suelos que presentan condiciones semiáridas, con una humedad baja, como los suelos franco arenosos, los cuales son ideales para el desarrollo de estos microorganismos debido a la aireación y poca capacidad para retener agua. La mayoría de las especies crecen en un rango de temperatura entre 25-30 °C.

Los actinomicetos han sido estudiados a lo largo del tiempo por el papel importante que desempeñan

en diferentes campos, equilibrando el suelo como un ecosistema dinámico y por su gran aporte a la industria en la producción de compuestos bioactivos como los antibióticos. Se ven involucrados en procesos de fitorremediación, reciclaje de los constituyentes más resistentes de la materia orgánica como lignina, celulosa, hemicelulosa y quitina. Debido a su amplia distribución, se pue-

den encontrar en superficies rocosas y en suelos rizosféricos, ricos en humus, hojarasca y estiércol, así como también en sedimentos marinos.

En la tabla 18 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a los registros de conteo de actinomicetos en los diferentes tratamientos y localidades.



**Tabla 18.**

Resultados del análisis estadístico efectuado al conteo de actinomicetos en el suelo utilizando un programa SAS (ANOVA y prueba de significancia de Tukey)

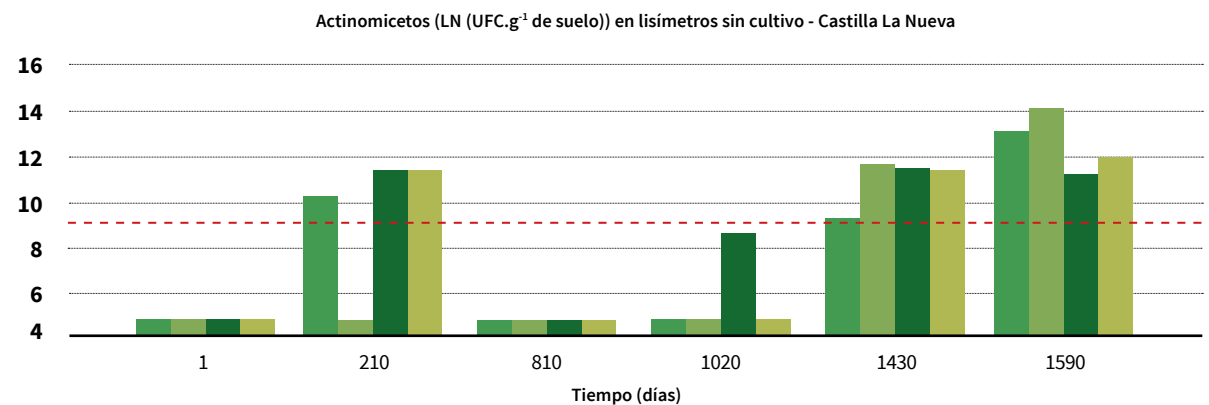
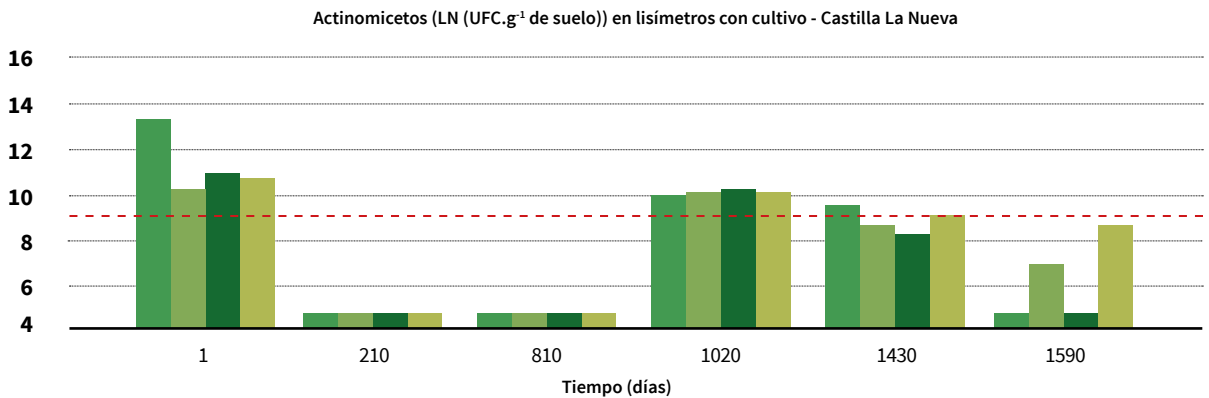
Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Actinomicetos (LN (UFC.g <sup>-1</sup> de suelo))			
	Media	Media	Media	Media
E100	8,69 a	7,35 ab	7,64 a	9,82 a
E80	8,68 a	6,88 b	7,34 a	9,97 a
N100	8,48 a	8,12 a	7,10 a	9,13 a
N80	8,24 a	7,58 ab	7,85 a	9,46 a

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. LN: logaritmo natural.

Como se puede apreciar, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Asimismo, los valores de conteo de unidades formadoras de colonias de actinomicetos se hallan en niveles próximos a los normales para este tipo de suelos.

En la figura 17, por otra parte, se presenta el comportamiento temporal de los actinomicetos del suelo para todos los tratamientos en Castilla La Nueva. Los conteos bajos corresponden a los suelos con el pH más ácido.

- E 100
- E 80
- N 100
- N 80



**Figura 17.**

Comportamiento de los actinomicetos del suelo en Castilla La Nueva

## Hongos

Los hongos son organismos saprofitos, aeróbicos, que desempeñan un rol muy importante en la transformación de los constituyentes del suelo. Intervienen en la descomposición de celulosa, hemicelulosa, pectinas, almidón, grasas y compuestos de lignina, así como en la formación del humus, y contribuyen al reciclaje de nutrientes y a la estabilidad de agregados mediante la degradación de residuos vegetales y animales. Estos microorganismos no contienen clorofila, y su biomasa es de 1.000 a 10.000 kg.ha<sup>-1</sup>. Son además los principales agentes de descomposición de la materia orgánica en todos los ambientes ácidos y poseen una red de filamentos o hifas en el suelo. El micelio se obser-

va fácilmente en los humus tipo mor y moder. La importancia de los hongos filamentosos en el suelo puede a veces incluso exceder a la de las bacterias.

Estos organismos se desarrollan bien en pH variado, pero prefieren los ácidos, donde las bacterias y actinomicetos no pueden competir. Asimismo, son importantes descomponedores de residuos en suelos forestales ácidos. Su población va de 100.000 a un millón por gramo de suelo.

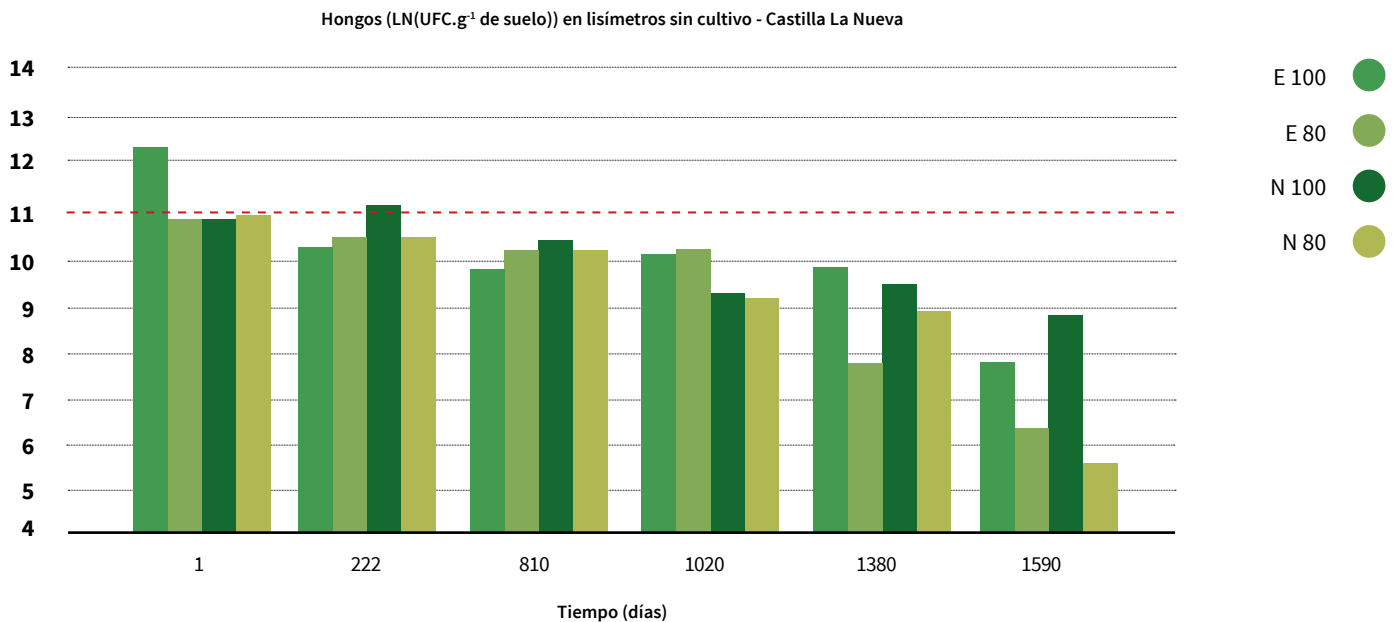
En la tabla 19 se presenta el resultado del análisis estadístico realizado al conteo de hongos del suelo en los tratamientos considerados en las dos localidades. Como se observa, no se presentaron diferencias significativas debidas a los tratamientos.

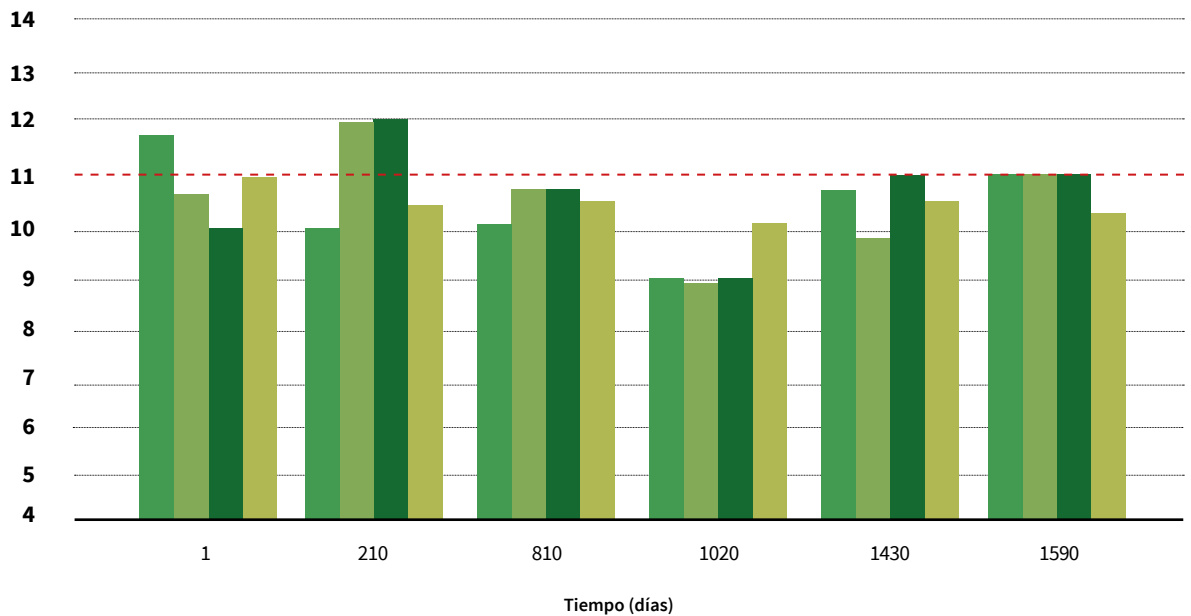
Investigación  
bajo condiciones  
controladas en el  
CI La Libertad y en  
Castilla La Nueva

Tratamiento	CI La Libertad		Castilla La Nueva	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo
	Hongos (LN (UFC.g <sup>-1</sup> de suelo))			
	Media	Media	Media	Media
E100	8,97 a	10,31 a	10,08 a	10,54 a
E80	9,12 a	10,23 a	9,23 a	10,62 a
N100	9,05 a	10,21 a	10,03 a	10,77 a
N80	8,71 a	10,05 a	9,19 a	10,64 a

←  
**Tabla 19.**  
Resultados del análisis estadístico efectuado al conteo de hongos en el suelo utilizando un programa SAS (ANOVA y prueba de significancia de Tukey)

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05).  
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. LN: logaritmo natural.





**Figura 18.**  
Comportamiento de los hongos del suelo en Castilla La Nueva

En la figura 18 se presenta la variación temporal de los hongos en todos los tratamientos para las dos localidades. Los lisímetros en donde se establecieron los cultivos son los que presentan un mayor conteo de unidades formadoras de colonias (alrededor de 100.000) por gramo de suelo.

Según Osorio (2012), la cantidad adecuada de hongos en el suelo se ha establecido en  $11 (10^4 \text{ a } 10^5 \text{ UFC})$ . Según esta referencia, todos los tratamientos, las localidades y los tipos de coberturas se encuentran en un rango aceptable.

### **Análisis ambiental en suelos (hidrocarburos totales del petróleo)**

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades del Gobierno de los Estados Unidos de América, en su artículo titulado “Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)”, revisado en 2014, diserta lo siguiente con relación a los aspectos ambientales de estos hidrocarburos:

**El término hidrocarburos totales de petróleo (TPH) se usa para describir a un grupo extenso de varios cientos de sustancias químicas derivadas originalmente del petróleo crudo.**

**En este sentido, los TPH son realmente una mezcla de sustancias químicas. Se les llama hidrocar-**

**buros porque casi todos los componentes están formados enteramente de hidrógeno y carbono. La mayoría de los productos que contienen TPH se incendian. Algunos TPH son líquidos incoloros o de color claro que se evaporan fácilmente, mientras que otros son líquidos espesos de color oscuro o semisólidos que no se evaporan.**

**Muchos de estos productos tienen un olor característico a gasolina, kerosén o aceite. Debido a que en la sociedad moderna se usan tantos productos derivados del petróleo (por ejemplo, gasolina, kerosén, aceite combustible, aceite mineral y asfalto), la posibilidad de contaminación ambiental es alta.**

**La contaminación con productos de petróleo estará constituida por una variedad de estos hidrocarburos. Debido al gran número de hidrocarburos involucrados, generalmente no es práctico medir cada uno de ellos. Sin embargo, es útil medir la cantidad total del conjunto de hidrocarburos que se encuentran en una muestra de suelo, agua o aire.**

**La cantidad de TPH que se encuentra en una muestra sirve como indicador general del tipo de contaminación que existe en el sitio. Sin embargo, la cantidad de TPH que se mide suministra poca información acerca de cómo hidrocarburos de petróleo específicos pueden afectar a la gente, los animales y las plantas.**

Cuando hay escapes o derrames de TPH directamente al agua, algunas fracciones de los TPH flotarán en el agua y formarán una capa delgada en la superficie. Otras fracciones más pesadas se acumularán en el sedimento del fondo, lo que puede afectar a peces y a otros organismos que se alimentan en el fondo. Algunos organismos en el agua (principalmente bacterias y hongos) pueden degradar algunas de las fracciones de los TPH.

Los TPH que son liberados al suelo pueden movilizarse hacia el agua subterránea a través del suelo. Allí, los componentes individuales pueden separarse de la mezcla original dependiendo de las propiedades químicas de cada componente. Algunos de estos componentes se evaporarán al aire y otros se disolverán en el agua subterránea y se alejarán del área donde fueron liberados. Otros compuestos se adherirán a partículas en el suelo y pueden permanecer en el suelo durante mucho tiempo, mientras que otros serán degradados por microorganismos en el suelo.

En el mundo actualmente existe un gran número de sitios contaminados, principalmente con hidrocarburos del petróleo. Este hecho ha generado interés de las instituciones gubernamentales y privadas por la legislación y remediación de estos lugares. En ese sentido, el conocimiento del tipo de contaminación y su concentración es fundamental, pues permite establecer las condiciones del sitio, el riesgo que representa y la selección de posibles tecnologías de recuperación.

Los límites de limpieza para hidrocarburos en suelos y aguas dependerán de los criterios o normas vigentes. En México se publicó en 2005 la Norma Oficial Mexicana NOM-Semarnat/SS-2003, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. En esta norma se establecen los límites en función de las fracciones ligera, media y pesada, así como del uso del suelo (tabla 20). Con esto en mente, en la tabla 21 se relacionan los resultados del contenido de hidrocarburos totales en suelos en los lisímetros de las dos localidades en estudio.



**Tabla 20.** Límites máximos permisibles en México para fracciones de hidrocarburos en suelo

Fracción de hidrocarburos	Uso del suelo
	Agrícola (mg.kg <sup>-1</sup> )
Ligera	200
Media	1.200
Pesada	3.000



**Tabla 21.** Aspectos ambientales del suelo en lisímetros de CI La Libertad y Castilla La Nueva (2015)

Tratamiento	Hidrocarburos totales (%) (extracción por ultrasonido/ infrarrojo)	
	CI La Libertad	Castilla La Nueva
E100	<0,00625	<0,00625
E80	<0,00625	<0,00625
N100	<0,00625	<0,00625
N80	<0,00625	<0,00625

E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

Método: Standard Methods for The Examination of Water & Wastewater (22nd edition 2012), NMX-AA-145-SCFI-200 8 Y SM 5520 CF

Los valores obtenidos en la valoración de los TPH, tanto para el CI La Libertad como para Castilla La Nueva, se encuentran por debajo del rango detectable: <0,00625% o 62,5 mg.kg<sup>-1</sup>, por el método de extracción por ultrasonido/infrarrojo del laboratorio Antek S. A. Esto demuestra que el uso de ATAEP como riego no generó respuesta en relación con el contenido de los TPH del suelo.

## Efectos en plantas

### Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), es una planta monocotiledónea que pertenece a la familia de las gramíneas. Como pasto perenne que es, puede multiplicarse a partir de semilla verdadera, yemas nodales y, en algunos casos, rizomas. Su ciclo de vida se caracteriza por un largo periodo vegetativo y una fase reproductiva altamente dependiente de las condiciones ambientales (García *et al.*, 2007).

La caña es un cultivo de zonas tropicales o subtropicales que requiere agua y suelos adecuados para crecer bien. Es una planta que asimila muy bien la radiación solar y tiene una eficiencia cercana al 2% de conversión de la energía incidente en biomasa. Un cultivo eficiente puede producir de 100 a 150 toneladas de caña por hectárea por año (14% a 17% de sacarosa, 14 al 16% de fibra y el 2% de otros productos solubles).

Este cultivo requiere extraer grandes cantidades de elementos nutritivos del suelo, los cuales deben incorporarse mediante procesos de fertilización. La variedad sembrada también establece los requerimientos de nutrientes. Se ha determinado que

tanto la germinación como el vigor de la planta dependen, en gran parte, del estado nutricional de la semilla (Manrique, Ramírez, Rangel y Bayona, 2008). Dependiendo de la variedad de caña y de la zona, requiere nitrógeno, fósforo y potasio y elementos menores para su fertilización.

El manejo agronómico del cultivo de caña comprende la interacción de factores de tipo genético (estudio de variedades), ecolimático (factores ambientales como presión atmosférica, radiación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación), edáficos (características de los suelos) y técnicos (relacionados con el manejo del cultivo). El estudio de estos factores permite determinar su influencia sobre la bioproductividad de la caña en una zona agroclimática dada; de este modo es posible entonces ubicar las variedades de acuerdo con su grado de adaptación al medio ecológico y en función de los rendimientos deseados.

### Localidad Castilla La Nueva

Los parámetros de crecimiento se evaluaron en los lisímetros con cultivo. El cultivo se tuvo en dos ciclos diferentes. Los resultados del análisis estadístico y los valores medios de las mediciones sobre altura de planta y diámetro del tallo se presentan en las tablas 22 y 23 y en las figuras 19 y 20.

Altura (cm) caña de azúcar – Castilla La Nueva

Ciclo 1				
	1. <sup>er</sup> corte	2. <sup>o</sup> corte	3. <sup>er</sup> corte	4. <sup>o</sup> corte
Tratamiento	179 días	350 días	533 días	808 días
	Media	Media	Media	Media
E100	213,58 ab	211,25 a	182,33 ab	198,58 b
E80	209,75 b	191,75 a	164,50 b	209,92 ab
N100	233,67 a	209,50 a	190,50 a	251,08 a
N80	223,42 ab	208,17 a	169,00 ab	201,83 ab
Ciclo 2				
	1. <sup>er</sup> corte	2. <sup>o</sup> corte	3. <sup>er</sup> corte	4. <sup>o</sup> corte
Tratamiento	235 días	465 días	741 días	983 días
	Media	Media	Media	Media
E100	171,03 a	144,13 ab	113,44 a	132,58 a
E80	147,92 a	123,27 b	109,25 a	154,42 a
N100	200,83 a	183,38 a	164,13 a	120,58 a
N80	201,12 a	149,25 ab	128,38 a	136 a

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ).  
E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

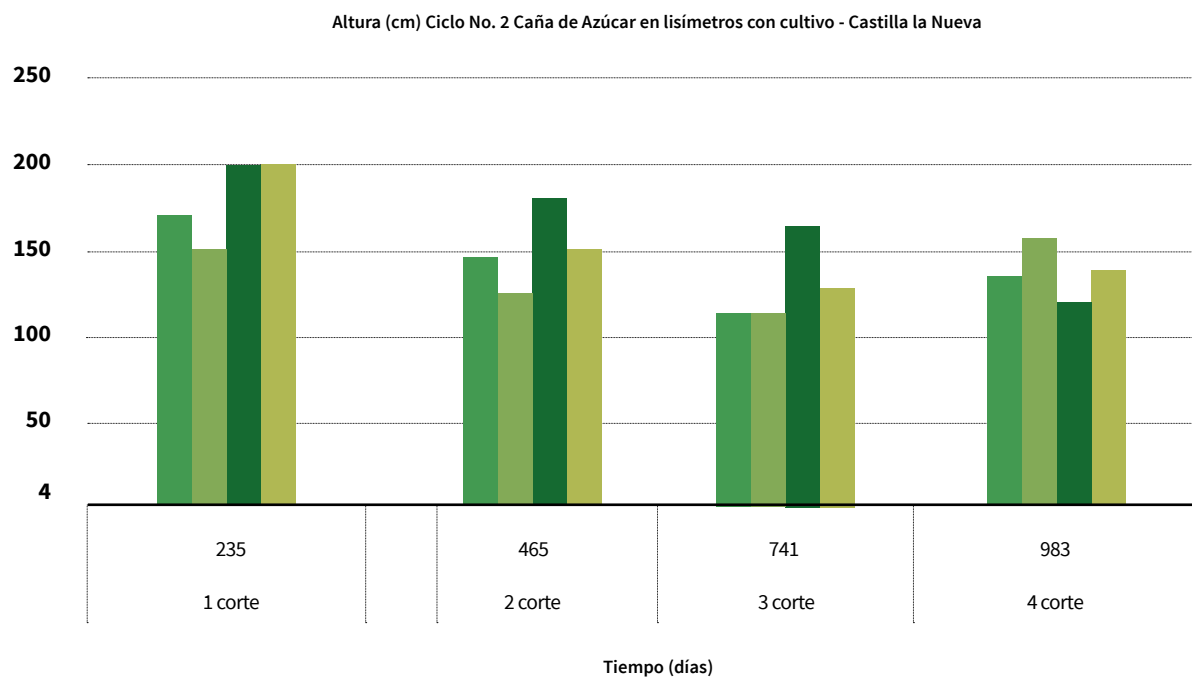
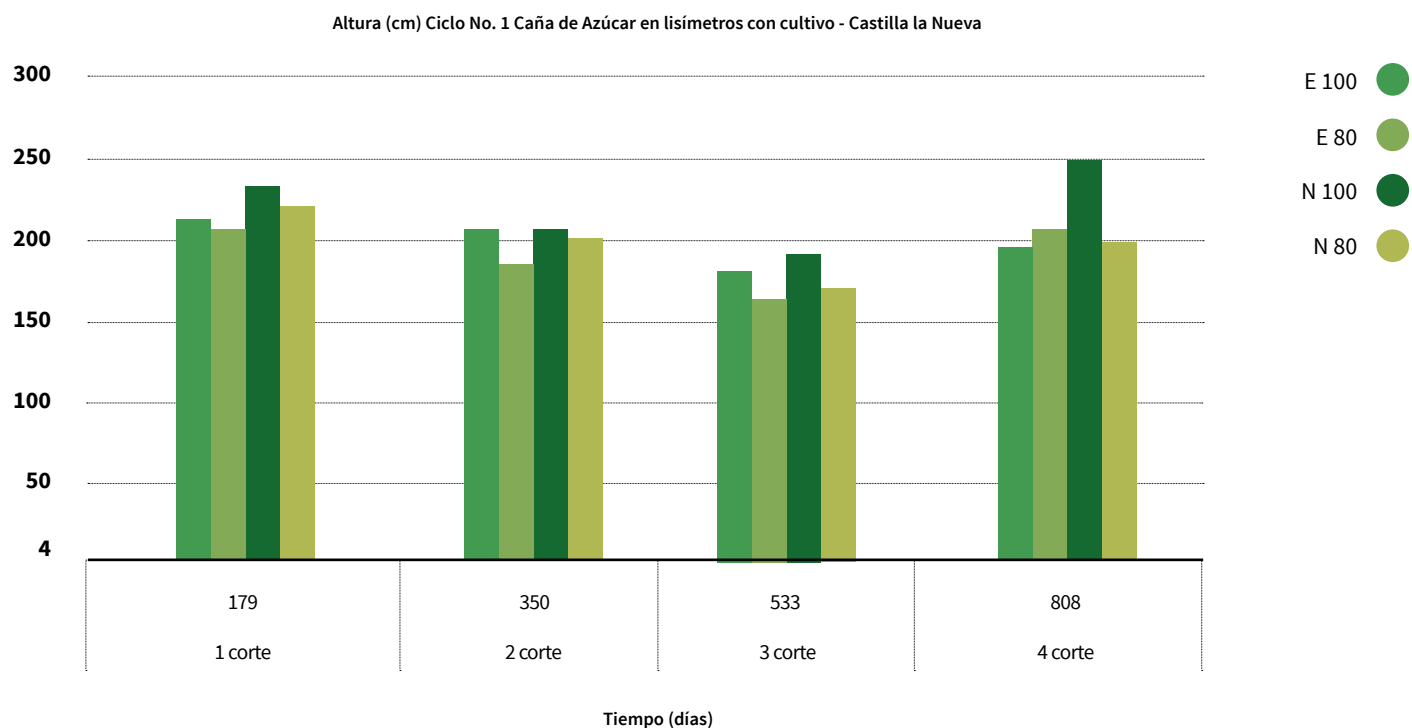


**Tabla 22.**  
Comportamiento de la altura de planta en los dos ciclos de producción de caña de azúcar en Castilla La Nueva

En cuanto a la altura de planta medida en la inserción de la última hoja abierta, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de calidad de agua y de dosis de riego. Los valores hallados se encuentran

un poco por debajo de los reportados como normales (300 cm) para la variedad CC 8592 con un ciclo de doce meses en suelos fértiles del Valle del Cauca (Vertic Us-tropept), según lo reportado por Cenicaña (2002).

Investigación  
bajo condiciones  
controladas en el  
CI La Libertad y en  
Castilla La Nueva



←  
**Figura 19.**  
Comportamiento  
de la altura (cm)  
en los dos ciclos  
de cultivo realiza-  
dos para caña de  
azúcar en Castilla  
La Nueva

En el tiempo se advierte una disminución de la altura, principalmente en los tratamientos con agua normal, aunque no muy marcada debido básicamente a que los periodos entre cortes fueron distintos.

**Diámetro (mm) caña de azúcar - Castilla La Nueva**

Ciclo 1				
	1.º corte	2.º corte	3.º corte	4.º corte
Tratamiento	179 días	350 días	533 días	808 días
	Media	Media	Media	Media
E100	22,17 a	20,03 a	20,42 a	17,50 a
E80	20,00 a	20,50 a	18,92 a	18,42 a
N100	20,17 a	18,97 b	17,75 a	18,00 a
N80	20,75 a	19,83 a	19,83 a	19,42 a
Ciclo 2				
	1.º corte	2.º corte	3.º corte	4.º corte
Tratamiento	235 días	465 días	741 días	983 días
	Media	Media	Media	Media
E100	25,83 a	24,31 a	23,6 a	22,83 a
E80	25,08 a	23,81 a	23 a	21,67 a
N100	24,25 a	22 a	22,2 a	24,83 a
N80	22,42 a	18,81 a	22,8 a	22,83 a



**Tabla 23.**

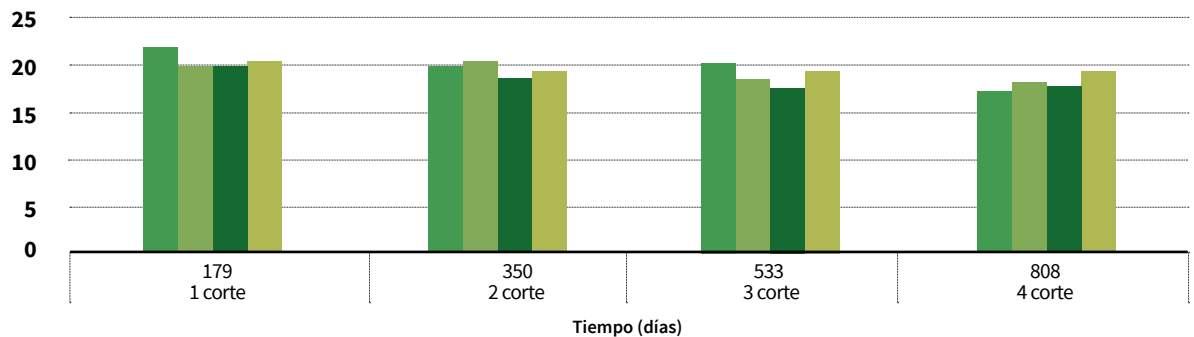
Comportamiento del diámetro del tallo en los dos ciclos de producción de caña de azúcar en Castilla La Nueva

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

En cuanto al comportamiento del diámetro del tallo en los dos ciclos de producción de caña de azúcar de Castilla La Nueva, no se observa que los tratamientos de agua tengan influencia significativa.

**Diámetro (mm) Ciclo No. 1 caña de azúcar en lisímetros con cultivo - Castilla la Nueva**

- E 100
- E 80
- N 100
- N 80

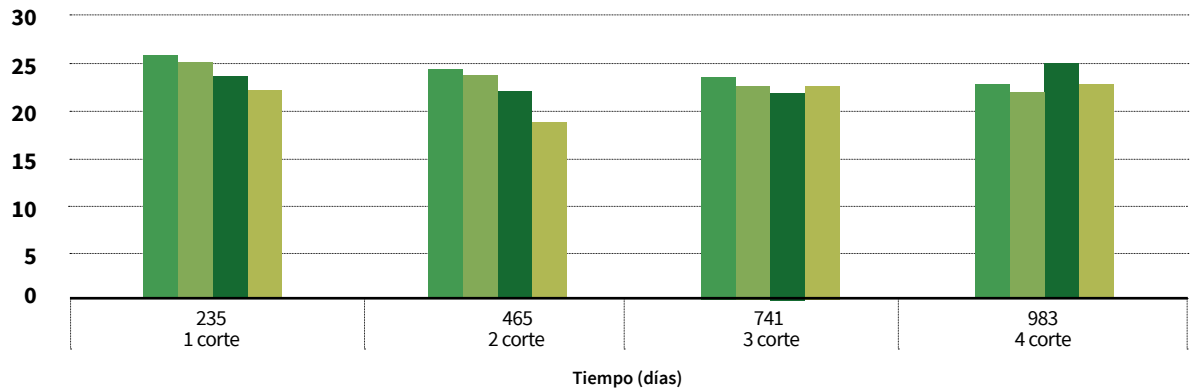


**Diámetro (mm) Ciclo No.2 caña de azúcar en lisímetros con cultivo - Castilla la Nueva**



**Figura 20.**

Comportamiento del diámetro del tallo en los diferentes cortes y ciclos de la caña de azúcar en Castilla La Nueva



En el tiempo y para los dos ciclos, en la medida en que se hacen los cortes, el diámetro de las plantas va disminuyendo. Esta medición también está influenciada por los periodos irregulares en que se realizaron las cosechas.

Los parámetros de crecimiento (altura y diámetro) de los dos ciclos de establecimiento del cultivo de caña de azúcar muestran un comportamiento similar entre tratamientos y cortes respecto a lo reportado en la literatura.

Por otro lado, en la tabla 24 y en la figura 21 se presentan los rendimientos encontrados expresados en t.ha<sup>-1</sup> de caña (materia verde y húmeda TCH). Al respecto cabe anotar que, para las condi-

ciones del Valle del Cauca, la cosecha se presenta entre los 10 a 14 meses en promedio. En el primer ciclo de Castilla La Nueva, la primera cosecha en plantilla se realizó a los 209 días, y para el segundo ciclo, a los 243 días (siete y ocho meses respectivamente), lo cual demuestra el rápido crecimiento del cultivo en las condiciones edafoclimáticas a las que fue sometido.

Cenicaña ha definido que el rendimiento promedio para la variedad estudiada, CC 8592, oscila entre 120 y 130 TCH. Como se observa en la tabla 24 y en la figura 21, tanto en el primer ciclo como en el segundo se encontraron rendimientos superiores a estos promedios. También se ve claramente que en el tiempo la producción decrece con los cortes.

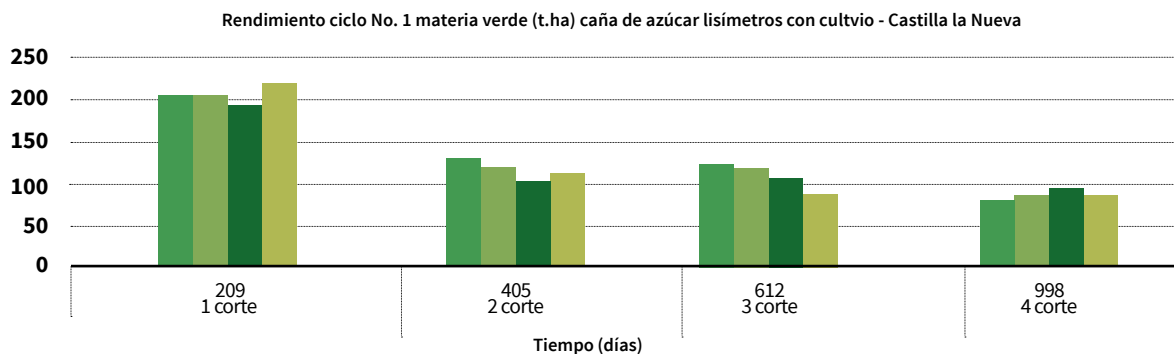
Rendimiento de materia verde (t.ha <sup>-1</sup> ) caña de azúcar – Castilla La Nueva				
Ciclo 1				
Tratamiento	1.º corte	2.º corte	3.º corte	4.º corte
	209 días	405 días	612 días	988 días
	Media	Media	Media	Media
E100	206,6 a	125,2 a	118,3 a	79,6 a
E80	202,2 a	117,5 a	113,7 a	81,8 a
N100	190,5 a	100,9 a	101,7 ab	92,4 a
N80	212,2 a	111,4 a	85,7 b	81,7 a
Ciclo 2				
Tratamiento	1.º corte	2.º corte	3.º corte	4.º corte
	243 días	490 días	813 días	1.075 días
	Media	Media	Media	Media
E100	117,9 a	110,9 a	115,8 a	69,9 a
E80	136,4 a	86,8 a	108 a	86,1 a
N100	146,7 a	130,8 a	154,3 a	95 a
N80	92 a	102,6 a	121,8 a	63,1 a



**Tabla 24.**  
Rendimiento medio (TCH) por corte y para los dos ciclos de caña de azúcar en Castilla La Nueva

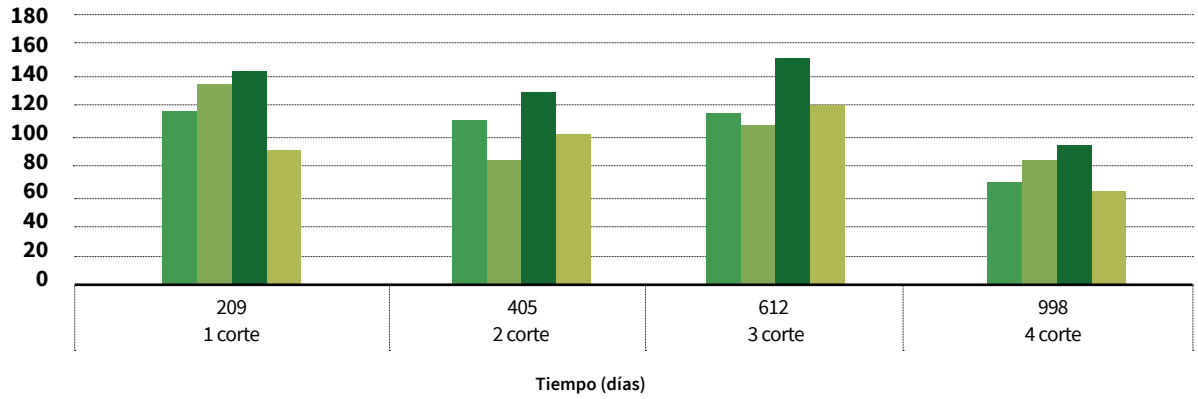
\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

En general, se ha establecido en términos económicos que es necesario renovar el cultivo cuando el TCH haya caído en más del 18% con respecto al potencial productivo en la plantilla, o sea, el 18% de 120 TCH (Riopaila-Castilla, 2007).



**Figura 21.**  
Comportamiento temporal del rendimiento en materia verde, expresado en t.ha, durante los ciclos 1 y 2 en caña de azúcar en Castilla La Nueva

- E 100
- E 80
- N 100
- N 80

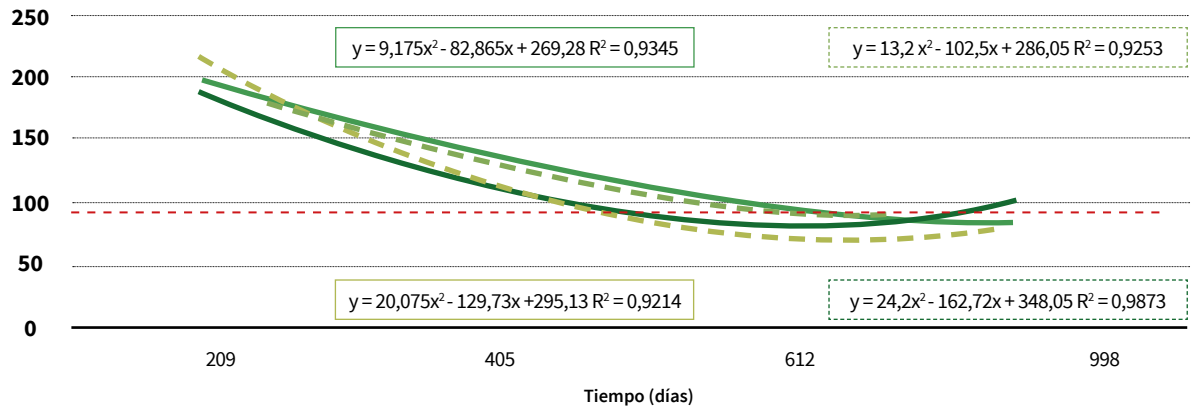


Con el objeto de establecer el comportamiento en el tiempo de esta variable cuando proviene de plantilla y de soca, se realizó un modelamiento matemático (figura 22) con los resultados de producción. En esta labor se consideró generar ecuaciones polinómicas de grado dos para la información de los cuatro trata-

mientos en los dos ciclos estudiados. El mejor ajuste se encontró en el ciclo 1 con R2 superiores a 0,9 para todos los tratamientos. Según el criterio establecido (línea roja), después de la tercera cosecha económicamente se hace necesario renovar para evitar pérdidas económicas o baja significativa de los ingresos.

Rendimiento ciclo No. 1 materia verde (t.ha<sup>-1</sup>) caña de azúcar lisímetros con cultivo - Castilla la Nueva

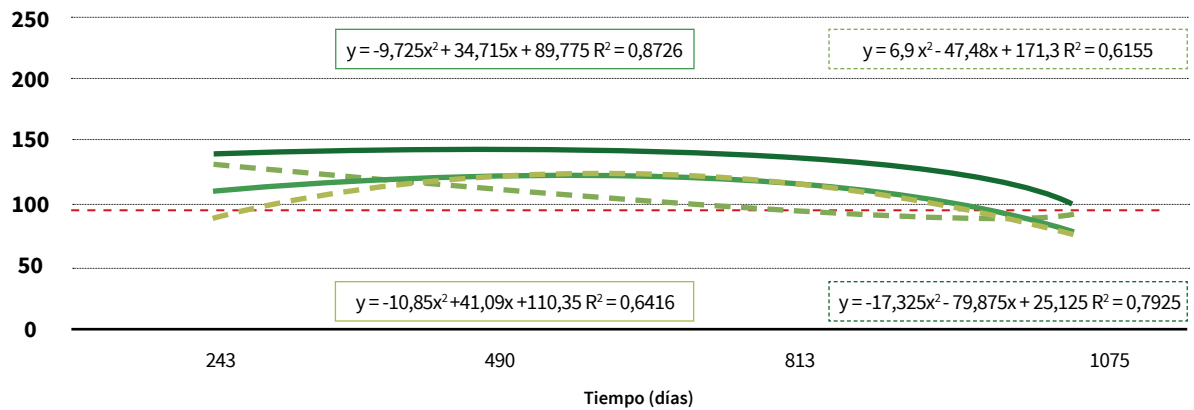
- (E100)
- - - (E80)
- (N100)
- - - (N80)



Rendimiento ciclo No. 2 materia verde (t.ha<sup>-1</sup>) caña de azúcar lisímetros con cultivo - Castilla la Nueva



**Figura 22.** Comportamiento de la disminución de producción en materia verde de caña de azúcar (t.ha<sup>-1</sup>) por envejecimiento del cultivo en Castilla La Nueva



La información que más se ajusta a este modelo en el ciclo 2 corresponde al tratamiento de ATAEP en la mayor dotación de riego (R2 de 0,87). En la figura se observa la línea que marca el límite admitido para considerar la renovación del cultivo.

Es interesante observar, con el modelamiento realizado en esta localidad, el efecto que tiene la cantidad del agua aplicada o dotación de riego cuando se aplicaron los tratamientos E100 y N100 (mantener el suelo a capacidad de campo) en la producción.

En el ciclo 2 también se observó que, después de la tercera cosecha, es recomendable renovar el cultivo para evitar baja en los ingresos producidos por esta actividad. Finalmente, vale la pena resaltar la productividad experimental obtenida para los tipos de suelo utilizados (oxisoles de baja fertilidad), que brindaron rendimientos similares a los encontrados en los vertisoles del Valle del Cauca.

## Pasto elefante

(*Pennisetum purpureum Schumacher*)

*Pennisetum purpureum Schumacher*, también llamado pasto elefante (PE), napier grass, king grass o linya mungu, es una gramínea perenne cespitosa estival de la tribu paniceae gigante, originaria de África tropical y húmeda, particularmente de Uganda, y naturalizada en América tropical y subtropical. La mayoría de los tipos son de altos y robustos tallos (superiores a 3 m) aunque se ha desarrollado tipos enanos. De raíces gruesas y rizomatosas, tallos cilíndricos y sólidos, folíolos lanceolados, generalmente pubescentes, que pueden alcanzar una longitud de 1,25 m. Su inflorescencia es una espiga de forma cilíndrica que se forma en el ápice de los tallos, cubierta densamente por espiguillas.

Este pasto es una planta C4 que presenta alta tasa fotosintética y, consecuentemente, alta producción de materia seca. Las bajas temperaturas son la mayor limitante para su producción de forraje. El mayor volumen radicular se encuentra en los primeros 15 cm de profundidad, dependiendo del suelo. Prefiere suelos profundos, bien drenados, y en general no resiste la sequía prolongada (Bemhaja, 2000).

En el país existen muchas variedades e híbridos introducidos de diferentes países. Es una especie

que se adapta a las condiciones tropicales y subtropicales, desde el nivel del mar hasta los 2.000 m, aunque su mejor desarrollo se obtiene por debajo de los 1.500 msnm, con temperaturas entre 18-30 °C, siendo la óptima 25 °C, con una humedad relativa entre el 60-80%. Produce en distintos tipos de suelos; sin embargo, los mejores resultados se obtienen en suelos fértiles, arcillo-arenosos, no muy pesados y que conservan cierta humedad, mientras que en suelos arenosos sin materia orgánica su desarrollo es deficiente. Es una especie mejoradora de la estructura del suelo.

Crece bien en suelos de pH bajo y resiste sequía y humedad. Su uso principal es el de corte, pero en algunas zonas se destina al pastoreo, ensilaje o producción de heno. Puede producir, en condiciones óptimas de suelo, humedad y fertilidad, entre 200-350 t.ha<sup>-1</sup>/año de forraje verde en ocho cortes, lo cual equivale a 40-70 t.ha<sup>-1</sup>/año de materia seca. Sin embargo, lo más frecuente es esperar rendimientos que fluctúen entre 180-200 t.ha<sup>-1</sup>/año de materia verde, de 35-40 t.ha<sup>-1</sup>/año de materia seca, con seis cortes al año (Segura y Norato, 1994). Estudios realizados en Puerto Rico mostraron que el pasto elefante, con una producción de materia seca por año de 25.200 kg, extrae del suelo 302 kg de nitrógeno (11,98 kg por tonelada de materia seca producida), 64 kg de fósforo (2,53 kg.t<sup>-1</sup> de materia seca), 504 kg de potasio (20 kg.t<sup>-1</sup>), 96 kg de calcio (3.81 kg.t<sup>-1</sup>) y 63 kg de magnesio (2,50 kg.t<sup>-1</sup>) (Ceniap, 2001).

El valor nutritivo de la especie varía con la época de corte y la edad. Los contenidos de proteína, calcio y fósforo disminuyen con el incremento de la edad, mientras aumenta la materia seca. En general se puede decir que el pasto tiene un 14,86% de materia seca, 4,38% de proteína, 0,19% de calcio y 0,44% de fósforo.

## Localidad Castilla La Nueva

Los parámetros de crecimiento se evaluaron en los lisímetros con cultivo. Los resultados del análisis estadístico y los valores medios de las mediciones sobre altura de planta y diámetro de planta se presentan en la tabla 25 y en la figura 23. Como se observa, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de las dos variables de crecimiento y desarrollo analizadas.

**Altura (cm) pasto elefante – Castilla La Nueva**

Ciclo 1					
	1.º corte	2.º corte	3.º corte	4.º corte	5.º corte
Tratamiento	68 dds	61 ddc	77 ddc	126 ddc	91 ddc
	Media	Media	Media	Media	Media
E100	167,1 a	163,2 a	158,7 a	243,7 a	198,6 a
E80	142,8 a	145,7 a	152,3 a	210,4 a	182,2 a
N100	147,7 a	138,1 a	150,6 a	229,5 a	173,6 a
N80	151,3 a	140,2 a	158,6 a	231,2 a	179,2 a

Ciclo 1					
	1.º corte	2.º corte	3.º corte	4.º corte	5.º corte
Tratamiento	68 dds	61 ddc	77 ddc	126 ddc	91 ddc
	Media	Media	Media	Media	Media
E100	15,92 b	13,25 a	11,5 a	11,08 a	13,83 a
E80	15,5 b	13,92 a	10,5 a	10,61 a	14,67 a
N100	19,83 a	13,25 a	10,92 a	11,67 a	13,67 a
N80	18,5 a	12,92 a	11,83 a	11,08 a	13 a



**Tabla 25.**

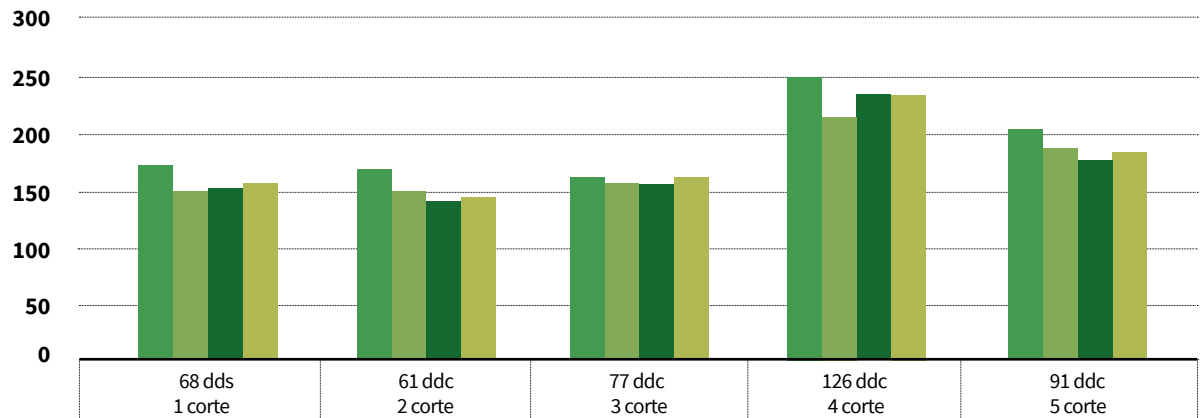
Comportamiento de la altura (cm) y del diámetro del tallo (mm) en el primer ciclo de cultivo del pasto elefante en Castilla La Nueva

\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey (p<0,05). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. dds: días después de siembra. ddc: días después de corte.

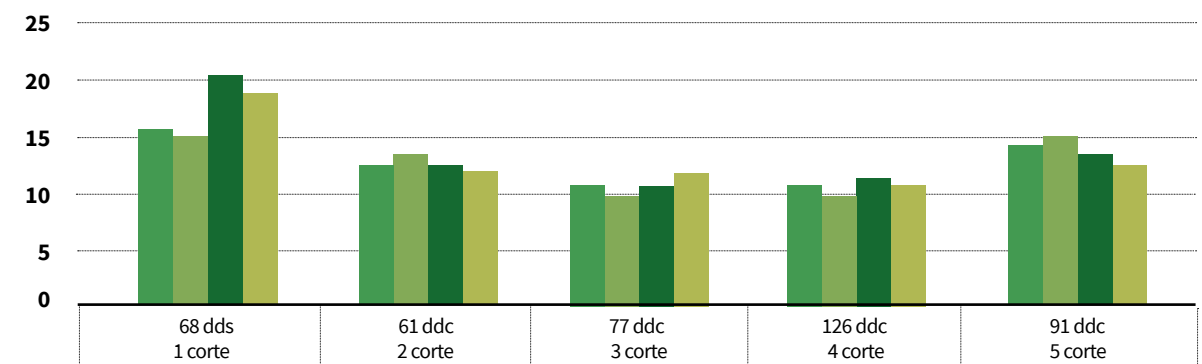
- E 100
- E 80
- N 100
- N 80

**dds:** días después de siembra  
**ddc:** días después de corte

**Altura (cm) Ciclo No. 1 Pasto elefante lisímetro 13 al 24 - Castilla la Nueva**



**Diámetro (mm) Ciclo No. 1 Pasto elefante lisímetros con cultivo - Castilla la Nueva**



**Figura 23.**

Comportamiento de la altura (cm) y del diámetro del tallo (mm) en cinco cortes diferentes del pasto elefante en Castilla La Nueva

Con relación al comportamiento de la altura y diámetro de planta para el mismo material genético evaluado en Castilla La Nueva y en el CI La Libertad, se observó que inicialmente el desarrollo del cultivo en Castilla fue privilegiado, condición probablemente asociada a la fertilidad del suelo y a la textura con un mayor contenido de arcillas.

Considerando la altura de planta, no se evidenciaron cambios significativos debidos a los tratamientos. Por otra parte, las alturas registradas se encuentran en los rangos (2-3 m de altura) reportados por Peters, Franco,

Schmidt e Hincapié (2011). Es de anotar que el rápido crecimiento de esta especie en las condiciones edafoclimáticas y de manejo del invernáculo de Castilla restringieron un poco el normal desarrollo de la investigación.

En la tabla 26 se presenta el resultado del análisis estadístico efectuado a los registros de producción, donde no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. En la figura 24, por otro lado, se presenta el comportamiento de la producción, expresado en t.ha de materia verde, para todos los tratamientos y cortes realizados.

**Rendimiento ciclo 1 materia verde pasto elefante - Castilla La Nueva**

	1.º corte	2.º corte	3.º corte	4.º corte	5.º corte
Tratamiento	70 dds	70 ddc	89 ddc	162 ddc	98 ddc
	Media	Media	Media	Media	Media
E100	155,2 a	138 ab	87,8 a	107,1 b	75,4 b
E80	142,1 a	151,5 a	104,5 a	116,9 ab	93,9 a
N100	153,5 a	125,6 b	101,1 a	136,5 ab	83,8 ab
N80	146,6 a	139 ab	92 a	147,2 a	92,3 ab

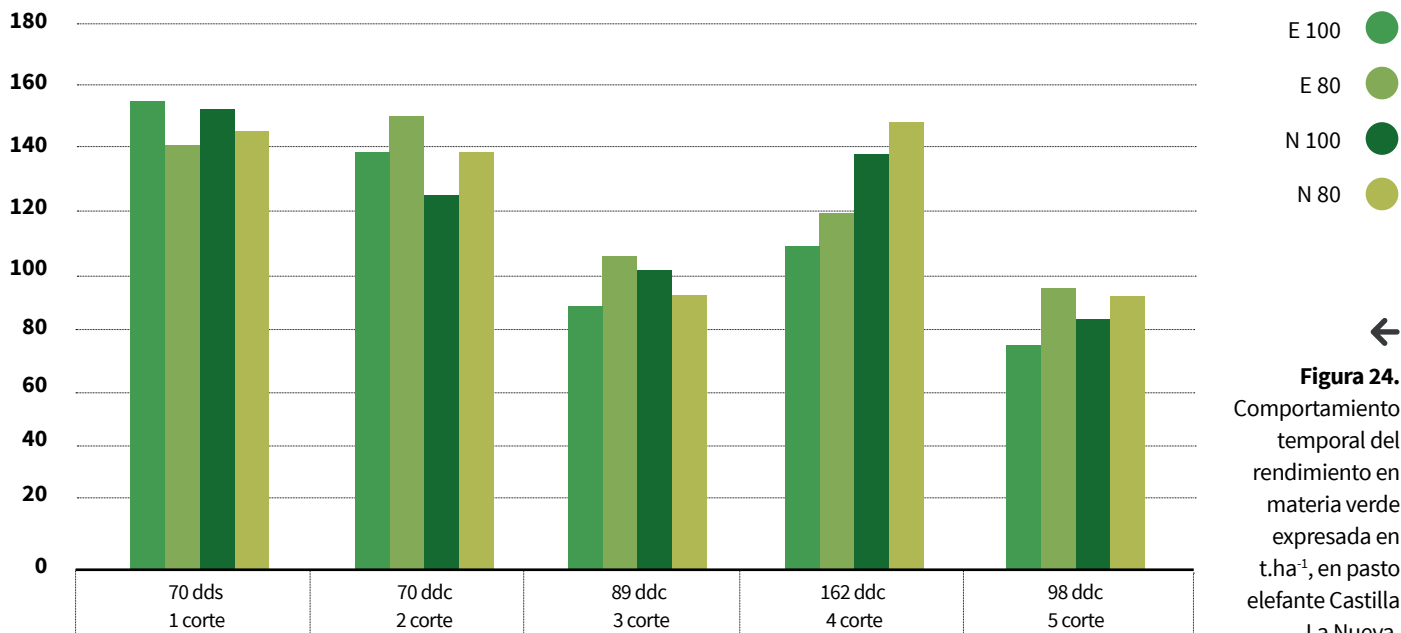
\* Letras diferentes dentro de una columna se corresponden con diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ). E: agua de Ecopetrol. N: agua normal. dds: días después de siembra. ddc: días después de corte.

←  
**Tabla 26.**  
Rendimiento medio, expresado en t.ha<sup>-1</sup>, del pasto elefante en Castilla La Nueva

Los rendimientos medios obtenidos en los cortes se encuentran por debajo de lo descrito por Cardona, Ríos y Peña (2012), quienes plantean que plantas de

pasto elefante pueden llegar a tener producciones que oscilen entre 80-100 t.ha<sup>-1</sup>/corte.

**Rendimiento en materia verde (t.ha<sup>-1</sup>) Ciclo No. 1 Pasto elefante lisímetro 13 al 24 - Castilla la Nueva**



←  
**Figura 24.**  
Comportamiento temporal del rendimiento en materia verde expresada en t.ha<sup>-1</sup>, en pasto elefante Castilla La Nueva.

## Análisis de tejido vegetal

El análisis de tejido vegetal es una técnica que determina el contenido de los nutrientes en tejidos de plantas de un cultivo muestreado en un momento o etapa de desarrollo determinado (Munson y Nelson, 1986; Campbell, 2000). Esta herramienta se basa en los mis-

mos principios que el análisis del suelo, asumiendo que la concentración de nutrientes en la planta está directamente relacionada con la habilidad del suelo para proporcionarlos y, a su vez, con la productividad de las plantas. En la tabla 27 se presentan los resultados obtenidos de tejido vegetal para las dos especies y las dos localidades estudiadas.



**Tabla 27.** Análisis de tejido para caña de azúcar y pasto elefante sembrados en los lisímetros con cultivo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Análisis de tejido vegetal en lisímetros con cultivo								
Cultivo	Localidad	Tratamiento	Concentración en porcentaje (%)					
			N	P	K	Ca	Mg	Na
Caña de azúcar	CI La Libertad	E100	0,43	0,13	0,65	0,08	0,05	0,02
		E80	0,34	0,12	0,41	0,10	0,05	0,02
		N100	0,31	0,11	0,26	0,14	0,04	0,01
		N80	0,34	0,08	0,17	0,18	0,04	0,01
	Castilla La Nueva	E100	0,63	0,08	0,56	0,15	0,05	0,04
		E80	0,31	0,06	0,24	0,05	0,03	0,04
		N100	0,19	0,06	0,12	0,07	0,02	0,02
		N80	0,19	0,06	0,24	0,05	0,02	0,01
Pasto elefante	CI La Libertad	E100	1,43	0,21	1,26	0,25	0,20	0,02
		E80	1,17	0,16	1,26	0,17	0,15	0,01
		N100	1,08	0,14	1,19	0,21	0,13	0,00
		N80	1,05	0,16	1,15	0,18	0,11	0,00
	Castilla La Nueva	E100	1,20	0,15	1,52	0,37	0,19	0,02
		E80	0,82	0,14	1,31	0,39	0,18	0,02
		N100	1,04	0,17	1,19	0,34	0,17	0,02
		N80	0,90	0,13	0,78	0,40	0,23	0,02

\* E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

### Caña de azúcar

Considerando la información consignada en la tabla 27, se encuentra para las dos localidades que el nitrógeno (N) es mayor en las plantas de caña de azúcar que fueron regadas con ATAEP que en las que fueron mantenidas con agua normal. Los valores encontrados, según los rangos establecidos por Bennet, Anderson y Jones, se catalogan como deficientes (<1,6%).

La tendencia observada para el nitrógeno también se advierte para el fósforo (P) y para el potasio (K), donde los tratamientos regados con ATAEP mostraron los valores más altos, aunque también para todos los casos están en niveles de deficiencia según las tres escalas consideradas.

Para el calcio (Ca) se reportan valores en el rango 0,05-0,18% (el valor crítico de deficiencia es <1%), y los valores menores registrados corresponden a

la localidad de Castilla La Nueva. Por otro lado, los niveles más altos de magnesio (Mg) se presentan en los tratamientos en donde se utilizó ATAEP, con un valor medio de 0,05%, mientras que que las escalas de evaluación consideradas sitúan el nivel crítico de este nutriente en valores inferiores a 0,08%.

El sodio (Na) se encuentra poco reportado en resultados de análisis foliar para caña de azúcar. Solo estudios recientes han comenzado a dilucidar la importancia de este elemento en la nutrición de las plantas C4, asociándolo a importantes procesos fisiológicos que se suceden en este tipo de vegetales. Bennett (1993) indica que el valor de suficiencia de este elemento está en el rango de 1-10%. Los valores encontrados en el CI La Libertad están entre 0,01-0,02%, siendo el mayor valor para los tratamientos de riego con ATAEP. La misma tendencia se observó en Castilla La Nueva, pero con valores de 0,04% para tratamientos E y 0,02% para los tratamientos N.

En términos generales, en los análisis foliares de caña de azúcar se encontraron valores menores de todos los nutrientes relacionándolos con los criterios establecidos para este cultivo. Sin embargo, es importante resaltar que los suelos en donde se realizó la investigación (oxisoles) son considerados pobres y de muy baja fertilidad. Por lo tanto, en el análisis de tejido vegetal del cultivo no se observó efecto alguno de los tratamientos de agua para riego empleados.

### Pasto elefante

Para el cultivo de pasto elefante se compararon los resultados obtenidos con la información reportada por Escobar y Ronquillo (2012). Así pues, mientras que el nivel de nitrógeno reportado como óptimo es de 1,5%, en esta investigación se encontró que este nutriente, en tejido vegetal, estaba en el rango de 1,43-1,05%, siendo los valores más altos para los tratamientos con ATAEP (E) en el CI La Libertad. El potasio también se mostró más elevado en los tratamientos con ATAEP, con un rango de valores de 1,26-1,15%, siendo el nivel óptimo de referencia 1%. El valor más alto se registró en Castilla La Nueva.

En el CI La Libertad se presentaron valores más altos de fósforo que en Castilla La Nueva. El rango de este nutriente en tejido vegetal osciló entre 0,21-0,14% y entre 0,17-0,13% para cada localidad respectivamente,

en tanto que el nivel óptimo reportado es de 0,2%. En Castilla La Nueva se presentaron los valores más elevados de calcio, los cuales se ubicaron en el rango entre 0,4-0,34%. En el CI La Libertad este rango se presentó entre 0,25-0,17%. En ambos casos, los niveles de calcio se consideran bajos si se comparan con el valor óptimo de referencia, que se sitúa en 0,5%.

El pasto elefante en las dos localidades presentó niveles del magnesio inferiores a los considerados óptimos (2,0%), con valores registrados en el rango de 0,11-0,23%.

Finalmente, el contenido de sodio en tejido vegetal de este cultivo osciló entre 0-0,02% (el valor 0% se registró para los tratamientos regados con agua normal en la localidad del CI La Libertad). Cabe anotar que, por ser el pasto elefante una planta C4, se espera que el sodio en los contenidos reportados actúe más como un nutriente que como un elemento tóxico. Los resultados discutidos permiten inferir que no se encontró efecto alguno en el tejido vegetal del pasto elefante por la calidad y los tratamientos de agua utilizados en este estudio.

### Análisis bromatológicos (proximales)

El propósito principal de un análisis proximal es determinar, en un producto, el contenido de humedad, grasa, proteína y cenizas.

Análisis proximales en lisímetros con cultivo						
Cultivo	Localidad	Tratamiento	Concentración en porcentaje (%)			
			Proteína cruda	Ceniza	FDN	Extracto etéreo
Caña de azúcar	CI La Libertad	E100	1,8	3,1	46,2	2,0
		E80	1,8	2,9	44,6	2,1
		N100	2,2	2,0	55,5	1,9
		N80	2,0	2,0	59,8	1,2
	Castilla La Nueva	E100	3,3	3,3	65,6	1,4
		E80	3,1	3,1	51,7	2,1
		N100	3,2	2,4	52,4	2,3
		N80	3,1	2,2	47,6	2,0
Pasto elefante	CI La Libertad	E100	6,1	9,2	55,0	2,3
		E80	6,1	8,6	85,6	2,0
		N100	4,8	6,7	70,2	2,0
		N80	6,1	7,7	70,2	1,7
	Castilla La Nueva	E100	5,7	9,2	71,3	2,0
		E80	4,4	8,1	74,2	2,0
		N100	4,4	6,7	74,7	2,0
		N80	4,8	5,9	73,3	1,0

\* E: agua de Ecopetrol. N: agua normal.

←  
**Tabla 28.**  
Análisis bromatológico (proximal) para caña de azúcar y pasto elefante sembrados en los lisímetros con cultivo en el CI La Libertad y en Castilla La Nueva

Estos procedimientos químicos son excelentes para realizar control de calidad y determinar si los productos suministrados alcanzan los estándares establecidos para garantizar su uso. En la tabla 28 se presentan los resultados obtenidos de los análisis proximales realizados para las dos especies y las dos localidades consideradas.

### **Caña de azúcar**

Para el cultivo de caña de azúcar se encontraron valores más altos de proteína cruda en la localidad de Castilla La Nueva (>2%). Sin embargo en los tratamientos que fueron regados con ATAEP en el CI La Libertad este valor fue un poco menor (1,8%). Si se compara con la información de referencia (Laredo, 1988; Zamora y Solano, 1994; INTA Argentina, 2012), todos los valores encontrados son inferiores a los niveles de referencia (4,5%).

La ceniza en los tratamientos de caña de azúcar que fue regada con ATAEP se presentó en una proporción superior a la de los tratamientos con agua normal en ambas localidades. El rango de valores encontrado para este parámetro de evaluación estuvo entre 2,0-3,3%, mientras que la información referencia sitúa este parámetro en valores alrededor de 5%.

En cuanto a la fibra en detergente neutro FDN, todos los valores registrados para caña de azúcar en las dos localidades presentan valores superiores al suministrado como referencia (30,5% según Laredo, 1988). En el CI La Libertad los valores mayores se dan en los tratamientos con agua normal; lo opuesto sucede en Castilla La Nueva.

El extracto etéreo para plantas de caña de azúcar debe ser, según referencia, menor de 2% (INTA Argentina, 2012; Zamora y Solano, 1994). Los valores encontrados para todos los tratamientos se presentan alrededor de este valor, de manera que los datos obtenidos coinciden con los reportados por la literatura. En definitiva, según los resultados de los análisis bromatológicos efectuados, no se observó influencia en los cultivos de los tratamientos de riego utilizados.

### **Pasto elefante**

Para el cultivo de pasto elefante, Rodríguez (1973), reporta un valor referencia de proteína cruda de

5,34%. La información encontrada en este experimento se encuentra en el rango de 4,4-6,1%, donde los valores más altos corresponden a los tratamientos en donde se utilizó ATAEP para el riego en la localidad del CI La Libertad.

Por otra parte, los mayores valores de cenizas, en ambas localidades, se registraron en los tratamientos donde se utilizó ATAEP para riego. Estas proporciones son ligeramente inferiores a las reportadas como referencia (12%, según Rojas, 2009).

Con relación a la fibra en detergente neutro FDN, todos los valores registrados para pasto elefante en las dos localidades presentan valores superiores al de referencia (30%, según Rojas, 2009 y Rodríguez, 1973).

Finalmente, el extracto etéreo para plantas de pasto elefante está alrededor de 1,8%, que es el valor referencia seleccionado para este caso (Rodríguez, 1973). Los valores encontrados para todos los tratamientos se presentan en el rango entre 1-2,3%, donde los valores mayores corresponden a los tratamientos de riego con ATAEP (E) en ambas localidades.

En definitiva, con los resultados totales de los análisis proximales obtenidos para los cultivos en los dos sitios de experimentación, no se observan cambios significativos en los parámetros evaluados debidos al uso de ATAEP. Los cambios observados se deben principalmente a las condiciones edafoclimáticas propias de cada localidad. Para este caso en particular, los análisis de tejido foliar y proximales se realizaron al final de cada periodo de cosecha sobre muestras totales de plantas y no solamente en hojas.

### **Análisis de condiciones climáticas**

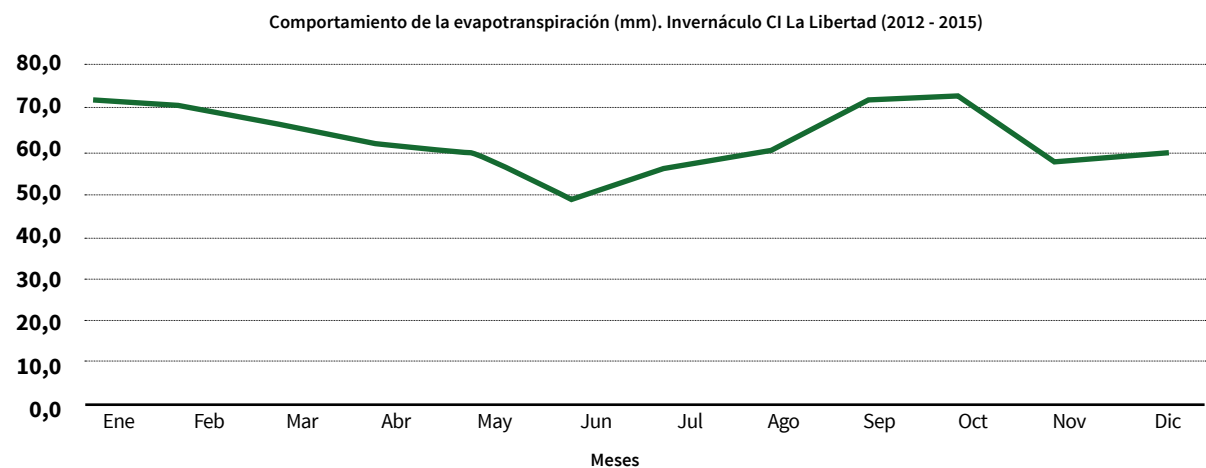
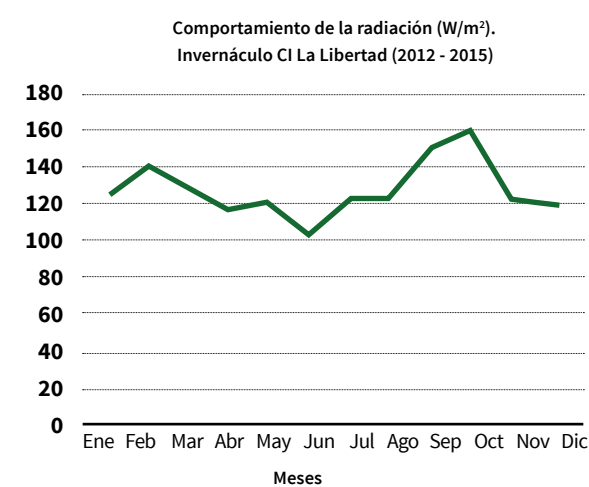
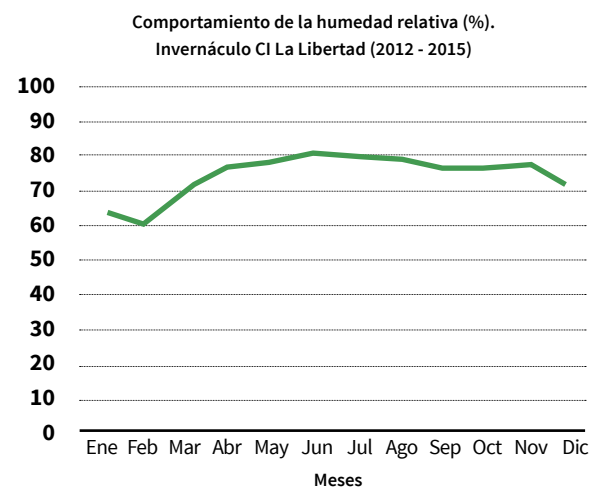
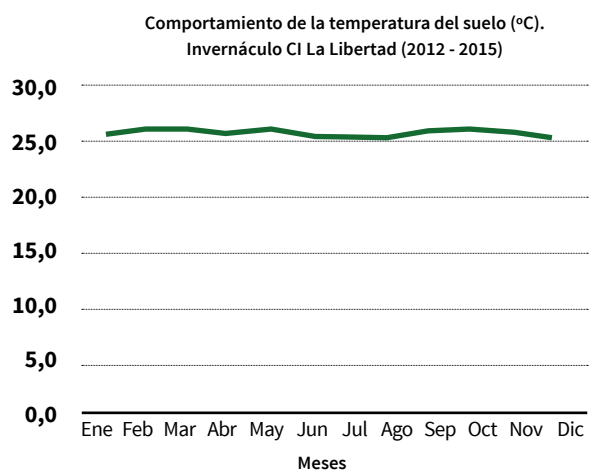
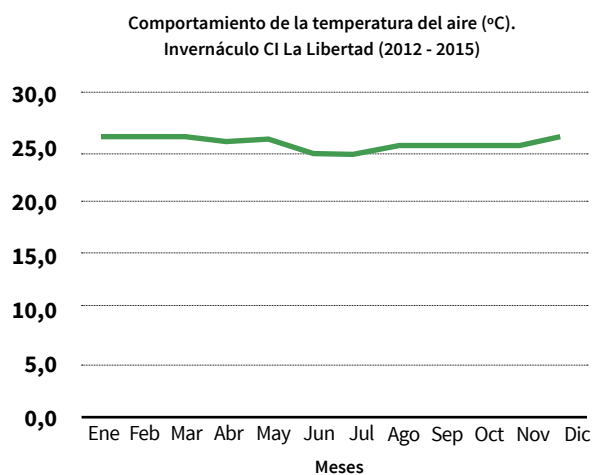
Para analizar las condiciones climáticas a las que estuvieron sometidos los cultivos, se obtuvieron 4.860 registros diarios de nueve parámetros climáticos de importancia para el control de la experimentación y el riego en el CI La Libertad, lo cual totaliza 43.740 observaciones entre los años 2012 y 2015. Tales parámetros fueron las temperaturas máxima, mínima y media del aire, las temperaturas máxima, mínima y media del suelo, la humedad relativa, la radiación y la evapotranspiración. En la figura 25 se presenta en forma gráfica el comportamiento mensual multianual de cinco parámetros climáticos considerados los más relevantes.

La temperatura del aire máxima media registrada en el invernáculo fue de 31,7 °C, con oscilaciones entre 29,8-33,5 °C (las máximas temperaturas se obtuvieron en los tres primeros meses del año). Entretanto, la temperatura media multianual dentro del invernáculo fue de 25,8 °C, la cual varió entre 24,5-27,4 °C.

La humedad relativa media multianual fue de 80,2%, considerada alta. Los meses más húmedos

fueron junio, julio y agosto, y los más secos, enero, febrero y marzo. La temperatura edáfica media multianual registrada fue de 27,5 °C, con una oscilación menor a un grado durante todo el año. El mes con mayor temperatura del suelo fue octubre.

La evapotranspiración anual multianual registrada por la estación climática fue de 763,1 mm. Los meses de mayor evapotranspiración fueron octubre, septiembre y enero.



←  
**Figura 25.**  
Condiciones  
medias de clima  
en el invernáculo  
del CI La Libertad  
(2012-2015)

# Efectos en agua

## Volúmenes de agua aplicada

En la tabla 29 se presentan las cantidades de agua aplicadas en las dos localidades y en los sistemas (con cultivo y sin cultivo). El volumen de agua de riego se determinó en función de los registros tomados diariamente con un medidor de humedad del suelo tipo TDR, a una profundidad de 20 cm desde la superficie.



**Tabla 29.** Volúmenes de agua aplicada en las dos localidades

Litros aplicados por lisímetro		
Dotación del 100%		
Lisímetros	CI La Libertad (2.699 días)	Castilla La Nueva (2.544 días)
Sin cultivo	14.208	13.980
Con cultivo	19.331	16.041

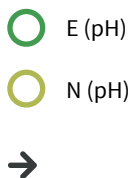
El consumo diario de agua por lisímetro sin cultivo en el CI La Libertad, para una dotación del 100%, fue de 5,2 mm, mientras que para la misma dotación, pero con cultivo, fue de 7,2 mm/día. La transpiración del cultivo fue entonces de 2 mm/día o 730 mm/año, que corresponde aproximadamente a la evapotranspiración calculada con la fórmula de Penman Monteith con la que trabaja la estación automática.

Para Castilla La Nueva, en los lisímetros sin cultivo se aplicaron 5,4 mm, y en los lisímetros con cultivo, 6,4 mm. La diferencia de consumo con el CI La Libertad radica principalmente en el tipo de suelo, con un mayor contenido de arcilla, lo cual permite un mayor almacenamiento de agua.

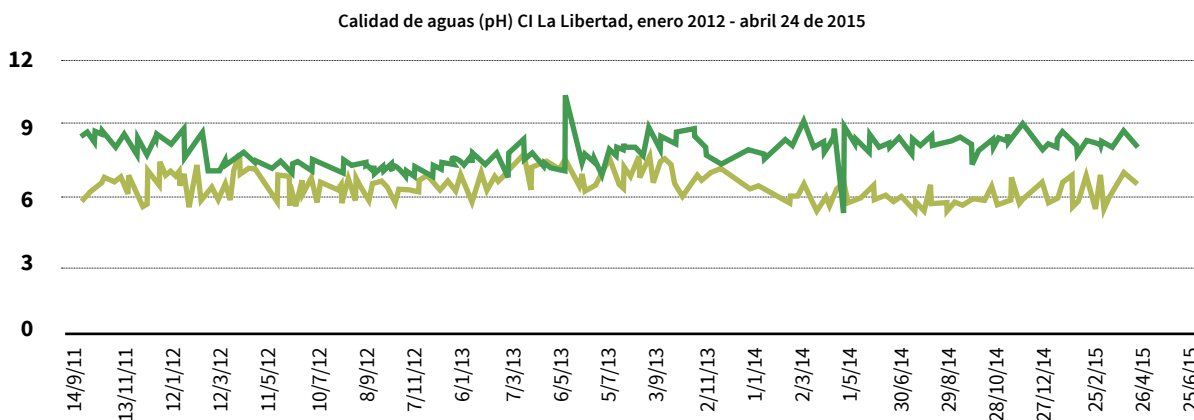
## Calidad del agua

En este aparte se considera que las ATAEP de la industria petrolera, antes de ser usadas para el riego en sistemas agropecuarios, cumplen con todas las condiciones legales actuales que regulan esta actividad, es decir, se ajustan a la normatividad legal vigente en el país (Decreto 1594 de 1984, Decreto 3930 de 2010 y Resolución 1207 de 2014). Las actividades realizadas en cuanto al registro de la calidad de agua utilizada en los experimentos básicamente consisten en el monitoreo de algunos parámetros básicos entre 2012 y 2015:

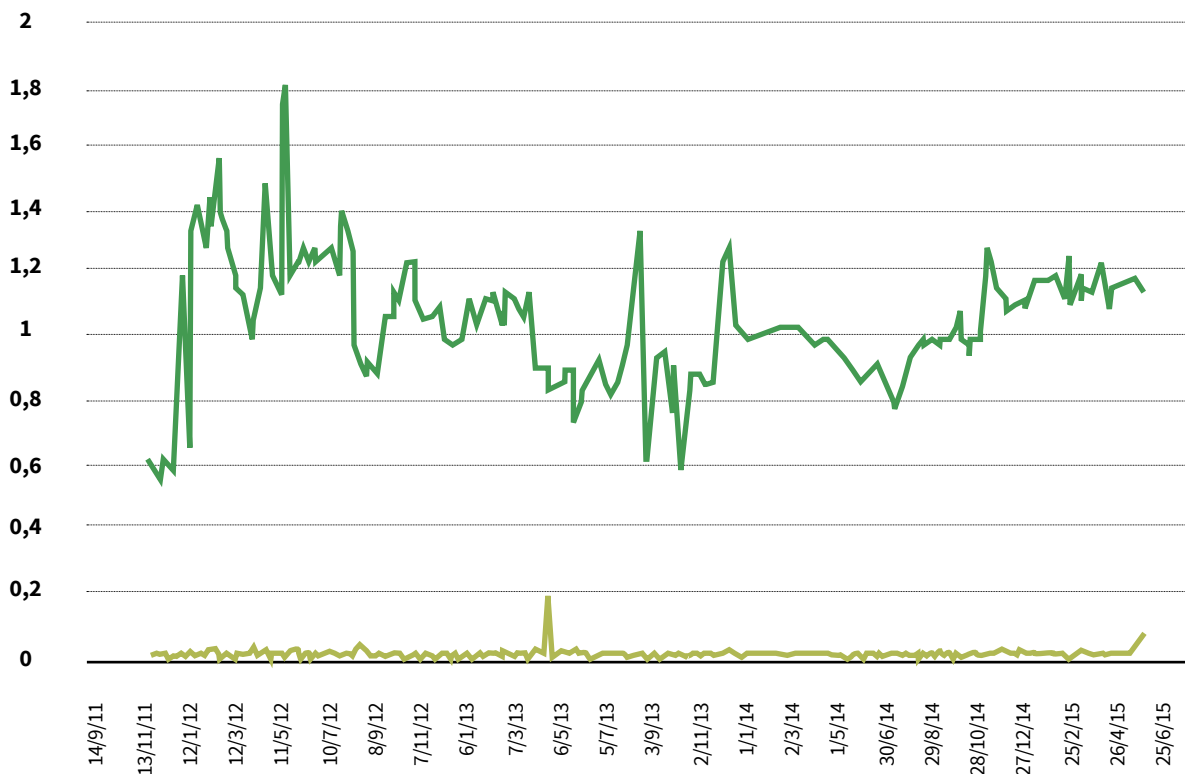
- **pH:** las aguas normales (N) en algunas ocasiones están por debajo de un pH de 6, especialmente en el último año de registro. Las aguas tratadas de Ecopetrol (E) solamente en una ocasión se ubicaron por fuera del rango establecido por la norma (figura 26).
- **Conductividad eléctrica:** en general, la conductividad eléctrica de las aguas evaluadas está por debajo del límite permisible establecido por la Resolución 1207 de 2014 sobre reúso de aguas ( $1.500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  o  $1,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) (figura 27).
- **Salinidad:** los valores encontrados de salinidad para el agua normal (línea verde claro en la figura 28) muestran la ausencia total de sales; para las aguas tratadas de Ecopetrol (línea verde oscuro en la figura 28), se observan oscilaciones alrededor de 0,5 ppt (partes por mil), con un promedio durante toda la experimentación de 0,48 ppt que la colocan en el rango de agua dulce. Los puntos fluctuantes superiores se dieron ocasionalmente, y en esos momentos el agua queda clasificada en el límite inferior del tipo agua salobre oligohalina (0,5 a 3,0 ppt).



**Figura 26.** Comportamiento de calidad de aguas (pH) en el CI La Libertad (2012-2015)

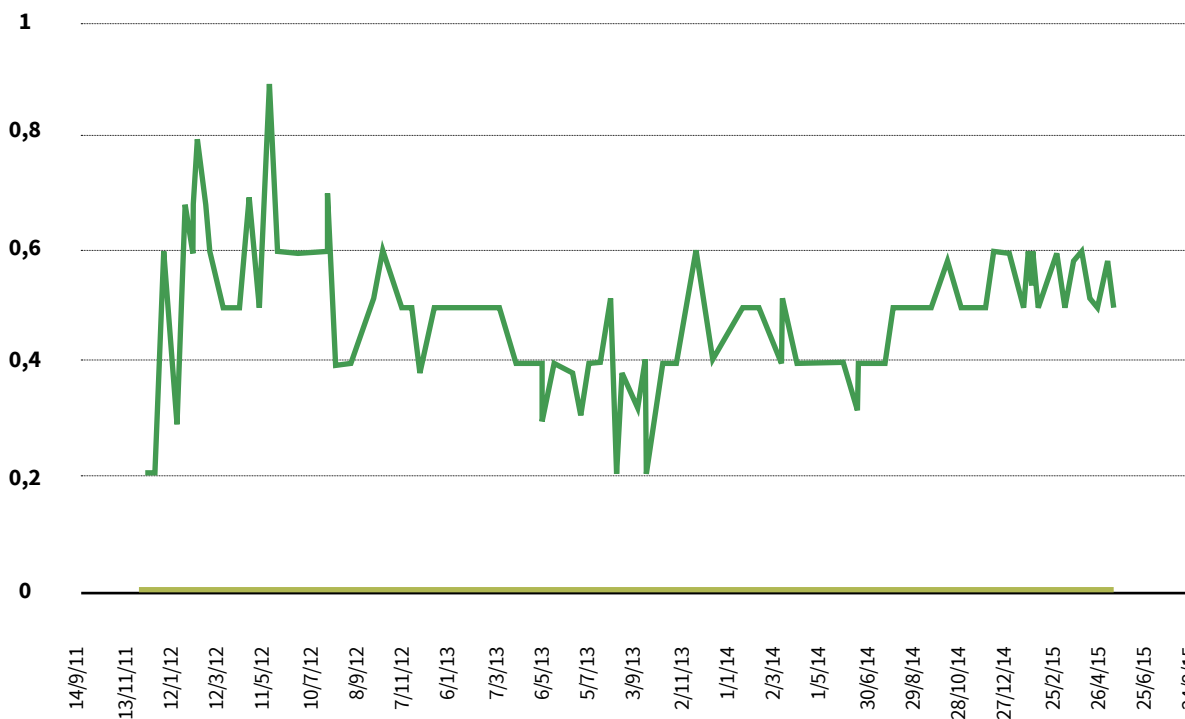


Calidad de aguas (Conductividad Eléctrica), CI La Libertad,  
enero 2012 - abril 24 de 2015.



←  
**Figura 27.**  
Comportamiento  
de calidad de  
aguas (CE dS.m<sup>-1</sup>)  
en el CI La Liber-  
tad (2012-2015)

Calidad de aguas (salinidad), CI La Libertad,  
enero 2012 - abril 24 de 2015.



E (ppt) ○  
N (ppt) ○

←  
**Figura 28.**  
Comportamiento  
de calidad de  
aguas (salinidad)  
en el CI La Liber-  
tad (2012-2015)