

Monitoreo de nitratos en los drenajes de palma aceitera (*Elaeis guineensis*): una herramienta para la sostenibilidad del cultivo

Laura Hernández Alpízar¹ , Jesús Mora Molina¹  & Ricardo Coy Herrera¹ 

1. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Química, Cartago, Costa Rica; lahernandez@itcr.ac.cr, jmora@itcr.ac.cr, rcoy@itcr.ac.cr

Recibido 21-VI-2019 • Corregido 12-XI-2019 • Aceptado 26-XII-2019

DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v12i1.2807>

ABSTRACT. “Nitrate monitoring in oil palm drainages (*Elaeis guineensis*): A tool for crop sustainability”. **Introduction:** Most nitrogen added in fertilizers to oil palm plantations (*Elaeis guineensis*) is lost by storm drainage or nitrate leaching, which impacts receiving water bodies and associated ecosystems. Losses could affect the sustainable development of the activity. **Objective:** This work evaluates the nitrates monitoring in agricultural drains of an oil palm crop, as a tool for decision making of fertilizer application and loss reduction. **Methodology:** We analyzed the concentration of nitrates in four drains located in soil with palm cultivation of different textural class, and homogeneous conditions of plantation age, climate and fertilization type, before and after fertilization events. We estimated the nitrate load, $Q_{NO_3^-}$ ($mg\ s^{-1}$), statistical and trend differences in drainages. **Results:** $Q_{NO_3^-}$ increases after fertilization, nevertheless, there is a significant difference in the variance of the groups (0.000033, $\alpha = 0.05$) determined by the variation of $Q_{NO_3^-}$ of the drainage located in soil of clay textural class (Q4). The $Q_{NO_3^-}$ exhibits a more positive rate followed of a more negative decrease after fertilization in Q4 than in the drainage of sandy textural class. **Discussion:** The differences of $Q_{NO_3^-}$ in the drainages are related to the textural class of the drained soil, the development of the roots and the depth at which the washing, assimilation, leaching and nitrate processing processes occur. **Conclusion:** The monitoring of nitrates in the drains of this crop allows to estimate the tendency of $Q_{NO_3^-}$ related to the textural class of the soil, and to visualize the rate of losses by leaching or pluvial washing. We recommend monitoring of $Q_{NO_3^-}$ in oil palm drains to make decisions about reduced or delayed fertilizer application in order to reduce losses.

Keywords: oil palm, fertilization, nitrates, sustainable agriculture, precision agriculture, natural resources.

RESUMEN. Introducción: La pérdida del nitrógeno adicionado en fertilizantes a las plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis*), ocurre principalmente por arrastre pluvial o lixiviación de nitratos, los cuales impactan cuerpos de agua receptores y ecosistemas asociados. Las pérdidas pueden afectar el desarrollo sostenible de la actividad. **Objetivo:** Evaluamos el monitoreo de nitratos en drenajes agrícolas de un cultivo de palma aceitera, como herramienta para la toma de decisiones de aplicación del fertilizante y reducción de pérdidas. **Metodología:** Analizamos la concentración de nitratos en cuatro drenajes ubicados en suelo con cultivo de palma de distinta clase textural, con condiciones homogéneas de edad de la plantación, clima y tipo de fertilización, antes y después de eventos de fertilización. Estimamos la carga de nitratos, $Q_{NO_3^-}$ ($mg\ s^{-1}$), las diferencias estadísticas y de tendencia en los drenajes. **Resultados:** $Q_{NO_3^-}$ aumenta después de la fertilización, pero existe una diferencia significativa en la varianza de los grupos (0,000033, $\alpha=0.05$) determinada por la variación de $Q_{NO_3^-}$ del drenaje ubicado en suelo de clase textural arcillosa (Q4). La $Q_{NO_3^-}$ exhibe una velocidad de crecimiento más positiva y una disminución posterior más negativa en Q4 que en el drenaje de suelo de clase textural arenosa. **Discusión:** Las diferencias de $Q_{NO_3^-}$ en los drenajes se relaciona con la clase textural del suelo drenado, el desarrollo de las raíces y la profundidad a la que suceden los procesos de lavado, asimilación, lixiviación y procesamiento de nitratos. **Conclusión:** El monitoreo de nitratos en los drenajes de este cultivo permite estimar la tendencia de $Q_{NO_3^-}$ relacionada con la clase textural del suelo, y visualizar la velocidad de pérdidas por lixiviación o lavado pluvial. Recomendamos el monitoreo de $Q_{NO_3^-}$ en los drenajes de palma aceitera para tomar decisiones sobre la aplicación reducida o retrasada de fertilizante con el fin de reducir pérdidas.

Palabras clave: palma aceitera, fertilización, nitratos, agricultura sostenible, agricultura de precisión, recursos naturales.

La palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) es el origen del 36% del mercado de aceites de semillas oleaginosas a nivel global (United States Department of Agriculture (USDA), 2017). En las últimas décadas, el área de su cultivo tuvo un crecimiento exponencial acorde con una fuerte demanda y altos precios del producto que se elevaron continuamente hasta el 2011 (USDA, 2017). Después de este periodo el precio bajó hasta un 60%, lo que afecta principalmente a los cultivadores de pequeña escala que son entre 40% y 60% del total (Boons & Mendoza, 2010; Rist, Feintrenie, & Levang, 2010; Román-Forastelli & Angulo-Aguilar, 2013; SEPSA, 2016)

El cultivo de palma abarca grandes territorios, ejerce presión y se introduce en áreas boscosas naturales, turberas y humedales no dedicados previamente a la agricultura, lo cual tiene una afectación a su composición biológica y sus servicios ecosistémicos. Este impacto negativo está bien documentado en las regiones tropicales donde se cultiva en mayor cantidad: Indonesia, Malasia y el trópico de América Latina (Konopik, Gray, Grafe, Steffan-Dewenter, & Fayle, 2014; Cunha, De Assis Montag, & Juen, 2015; Nainar et al., 2016; Walsh et al., 2016; Dislich et al., 2017).

En Costa Rica, la cobertura del cultivo de palma aceitera es alrededor de 70 000 hectáreas ubicadas principalmente en el pacífico Central y Sur, y son producto de un aumento de casi 300% en el área de cultivo entre los años 1984 y 2015 (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2015). Su continuo crecimiento se desarrolla alrededor de regiones naturales protegidas como es el caso del Humedal Nacional Térraba Sierpe, un humedal RAMSAR ubicado en el cantón de Osa (Román-Forastelli & Angulo-Aguilar, 2013). El cultivo en esta zona ha determinado el empobrecimiento de alrededor del 50% de la riqueza de anfibios y reptiles (Gallmetzer & Schulze, 2015).

Con el objetivo de mantener y mejorar los rendimientos de producción durante los 25-30 años del ciclo de vida de la palma aceitera, se recomienda utilizar una fertilización intensiva con formulaciones nitrogenadas de producción industrial, y esta fertilización es vista por algunos autores como una forma de limitar su área de expansión (Boons & Mendoza, 2010; Pirker, Mosnier, Kraxner, Havlík, & Obersteiner, 2016; Hoffmann et al., 2017; Khatun, Reza, Moniruzzaman, & Yaakob, 2017; Woittiez, van Wijk, Slingerland, van Noordwijk, & Giller, 2017). Sin embargo, la fertilización es entre 25 y 30% del costo de producción del cultivo, y los pequeños agricultores tienen dificultades para realizarla, especialmente cuando enfrentan problemas económicos por la baja del precio del producto (Colchester et al., 2013; Khatun et al., 2017).

Por otra parte, el uso intensivo de fertilizantes industriales disparó la introducción a la atmósfera de óxidos de nitrógeno, con un potente efecto invernadero, y la presencia en exceso de nitratos lixiviados o arrastrados superficialmente hacia el recurso hídrico que pueden provocar efectos ambientales negativos de alto impacto a nivel global tales como la acidificación de suelos, la contaminación de aguas subterráneas o la eutrofización de aguas superficiales y costeras (Galloway et al., 2008; Fowler et al., 2013; Olivares, Bedmar, & Sanjuán, 2013). El alto riesgo de impactos desconocidos para el planeta que resulta de este desequilibrio entre la alta fijación antropogénica del nitrógeno en especies reactivas (formas reducidas y oxidadas) y su degradación natural, se cita junto a otros grandes problemas globales como el cambio climático o la pérdida de biodiversidad (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015).

En la fertilización intensiva del cultivo de palma aceitera se obtienen grandes pérdidas del nitrógeno adicionado, principalmente por lixiviación de nitratos (80%) y hasta un 34% en palmas jóvenes (Pardon et al., 2016). En el proceso de lixiviación interviene la clase textural del suelo. La diferencia en el flujo derivada del mezclado incompleto entre el agua que se infiltra, y el agua localizada en pequeños poros del suelo, varía con la textura, así como varía la interacción de los iones con los sitios de intercambio catiónico o aniónico (Van der Laan, Stirzaker, Annandale, Bristow, & Preez, 2010; Annandale et al., 2013). El uso excesivo de fertilizantes modifica la estructura del suelo e incrementa el proceso de lixiviación (Dubos, Snoeck, & Flori, 2017). La medición de la



lixiviación en suelos heterogéneos, muy estructurados o arcillosos, es difícil (Addiscott, 1996). Además, en las zonas tropicales, donde se cultiva principalmente la palma aceitera, abundan los suelos aluviales en los que la capa superficial (<30cm) puede presentar variaciones significativas de la textura en distancias menores a 400m (Owens, Whisler, Jenkins, Thomasson, & Iqbal, 2005). Esta variabilidad cambia con las inundaciones y el tiempo de manera que gestionar con precisión la administración de fertilizante necesita de un análisis frecuente del suelo y las plantas (Owens et al., 2005; Reza et al., 2016; Hoffmann et al., 2017).

Sin embargo, ya que la calidad de la producción del cultivo de palma aceitera está limitada por la baja aeración y gran humedad de las zonas tropicales, generalmente, se construye entre hileras de siembra avenamientos o drenajes superficiales agrícolas con una profundidad entre 1-1,5m, los cuales sirven para mantener la tabla de agua por debajo de las raíces (Duran & Ortiz, 1995), y estos drenajes agrícolas superficiales han mostrado gran eficiencia en la recepción de lixiviados de nitratos de los cultivos (Estrada-Botello et al., 2007). El contenido de nitratos en un drenaje puede estar determinado por factores tales como la intensidad de la fertilización o del lavado pluvial, el procesamiento del suelo, su clase textural o el desarrollo de los raíces y el nivel de agua, y todos estos elementos son identificados de gran peso en el modelaje de rendimientos de plantaciones maduras de palma (Pardon et al., 2017).

En este estudio se presenta la utilización del monitoreo de nitratos en drenajes superficiales de un cultivo de palma, para la determinación de su tendencia con la aplicación de fertilizante y su relación con diferentes características del suelo drenado y condiciones de la planta, y adicionalmente, se discute su uso como herramienta para la toma de decisiones de aplicación del fertilizante.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en una finca de palma aceitera de 19ha ubicada en Palmar Norte, provincia Puntarenas, Costa Rica. Esta región se caracteriza por presentar bosque húmedo tropical con suelos de tipo inceptisol (según clasificación USDA, CIA, 2016). El clima es de tipo PS2 con lluvias anuales entre 2 000 y 4 000mm que merman entre enero y abril (Solano & Villalobos, 2000). La finca tiene cuatro hectáreas con plantas de seis años y quince hectáreas con plantas de doce años. Esta diferencia no plantea requerimientos de nutrición muy diferentes (Pardon et al., 2017). La totalidad del terreno se mantiene limpio de material orgánico entre las hileras. El volumen de precipitación que recibe todo el cultivo es similar y la disponibilidad económica del agricultor para la fertilización, el fertilizante utilizado, la dosis y forma de aplicación es igual para toda la finca.

Drenajes: Los drenajes estudiados presentan un declive similar, 1m de ancho y una profundidad entre 1-1,5m. Q2, Q3 y Q4 son drenajes secundarios que se dirigen hacia el drenaje principal Q1 (Fig. 1, Cuadro 1).

Análisis de suelos: Aplicando un muestreo estratificado aleatorio (Sparks, 1996), se tomaron 13 muestras suelo de 1kg al final del periodo lluvioso (noviembre). Las muestras se obtienen a una profundidad entre 30-40cm ya que ahí se encuentra la mayoría de las raíces que utilizan los nutrimentos (Owen, 1992). Se determinó la composición elemental y la clase textural de este conjunto de muestras. En el siguiente periodo de entrada de lluvias (mayo), se tomaron seis muestras compuestas distribuidas en las diferentes áreas de suelo identificadas (Cuadro 1 y Cuadro 2 en Apéndice digital). Los análisis tanto de composición como de textura se efectúan en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) con los procedimientos recomendados para suelos con cultivo de palma.



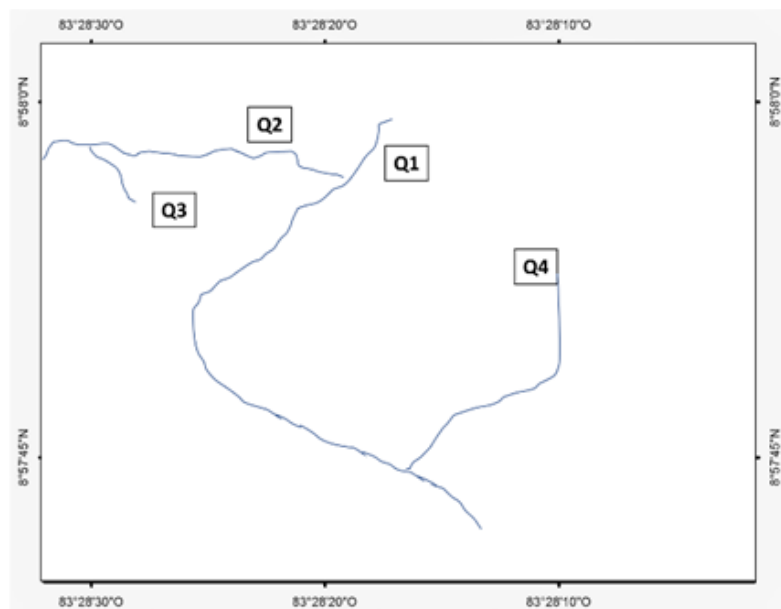


Fig. 1. Ubicación de los drenajes.

CUADRO 1

Descripción de los drenajes, suelo y productividad del cultivo por sector

DRENAJE	DESCRIPCIÓN
Q1	EL drenaje Q1 es una quebrada con origen en el cerro San Miguel, un área boscosa conservada fuera de la finca. Q1 puede contener aportes de nitratos no registrados por lo que se utiliza como control de aleatoriedad. Es el drenaje principal o madre, de caudal mayor a lo largo del año.
Q2	Drenaje secundario ubicado en suelo de clase textural arenosa ¹ . La palma de esta zona es la de menor productividad en la finca.
Q3	Drenaje secundario ubicado en suelo tipo arenoso y arcilloso ¹ . Se observa presencia de sedimentos frescos. Contiene agua de tipo estacional. La palma de esta zona es de mayor productividad que Q2, pero menor al área donde se encuentra Q4.
Q4	Drenaje secundario ubicado en suelo de clase textural arcillosa ¹ . En periodos de lluvias intensas, el área de cultivo donde se encuentra este drenaje se inunda por crecimiento del río Grande de Térraba. La palma de esta zona es la de mayor productividad.

¹ Fig. 1, Cuadro 1 en Apéndice digital

Toma de muestras en los drenajes: Los agricultores usualmente fertilizan en periodos de entrada o salida de lluvias. En el año de monitoreo las lluvias comenzaron en mayo y terminaron al final de noviembre. Hubo un periodo intermedio de merma de lluvias en septiembre. En estos tres periodos el agricultor aplicó fertilizante y se tomaron muestras puntuales de agua para el análisis de nitratos, siempre en el mismo sitio (ubicado con GPS) y entre 10-15cm debajo del nivel del agua. El agricultor notificó su intención de fertilización y las muestras fueron tomadas entre 2 y 10 días previos y seguidamente posteriores a la actividad de fertilización del cultivo. El número de días fue variable en cada ocasión, sin embargo, esto no afectó la robustez del diseño experimental ya que es un análisis de tendencia, y la toma de la muestra en los cuatro drenajes se realiza el mismo día (igual tiempo transcurrido de procesamiento del fertilizante) y en las mismas condiciones climatológicas. Para control de calidad de la muestra se mide pH y conductividad en el sitio, con un pH metro-conductímetro de campo, marca Metrohm, y electrodos apropiados para el tipo de agua analizada (conductividad y acidez media). Las muestras son llevadas en hielera y en botellas oscuras HPDE al

laboratorio donde son filtradas con filtros de nylon, 0,45 μ m. La cuantificación de nitratos se realiza por espectrofotometría directa UV, con análisis en flujo continuo. El espectrofotómetro es modelo USB2000 de OceanOptics, y el método utilizado es el validado para el análisis de aguas potables (Hernández-Alpizar & Coy-Herrera, 2015) con modificación por el método de adición estándar para la corrección de interferencias de materia orgánica.

Carga de nitratos: La cantidad de nitratos que transporta cada drenaje se obtiene por estimación de la carga a partir de los datos de concentración y caudal. El caudal de cada drenaje se obtiene por aproximación del área transversal y medición del flujo del agua. El área transversal se estima por sumatoria de segmentos equidistantes de una línea que se traza perpendicular de orilla a orilla en cada drenaje, la distancia de los segmentos es multiplicada por la altura respectiva del agua en cada uno. El flujo (m/s) es obtenido por mediciones repetidas del tiempo que un objeto flotante tarda recorriendo una distancia previamente establecida. La incertidumbre de esta estimación se reduce repitiendo al menos tres veces la medición hasta obtener un valor constante o similar. Con los datos de caudal (m³/s) y concentración de nitratos (mg/L) se obtiene la carga de nitratos (mg/s) de cada drenaje.

Fertilización: EL agricultor aplica fertilizante granulado y es distribuido por voleado en el área que define la sombra de las hojas más grandes alrededor de la planta. La cantidad varía entre caja llena (1,5kg) o media caja, y la misma cantidad es aplicada de manera homogénea, de acuerdo con la disponibilidad económica para compra de material y la percepción del agricultor del mejor momento climatológico para la fertilización. El fertilizante es el recomendado y vendido por Palma Tica, S. A. La fórmula contiene: nitrógeno 11,34%, fósforo 8%, potasio 24%, magnesio 4%, boro 0,30% y azufre 3,20%.

Prueba y planteamiento estadístico: Se utiliza la prueba estadística ANOVA para el análisis de variancia de los cuatro grupos que conforman los datos de monitoreo de los cuatro drenajes, y se utiliza la prueba Tukey para determinar cuál o cuáles grupos hacen la diferencia.

Ética, conflicto de intereses y declaración de financiamiento: La autora y coautores declaran haber cumplido con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en el manuscrito; que no hay conflictos de interés de ningún tipo, y que todas las fuentes financieras se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. Asimismo, están de acuerdo con la versión editada final del documento. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

RESULTADOS

La tendencia de la concentración y carga de nitratos en los drenajes se muestra en la figura 2 y figura 3, respectivamente. El monitoreo comienza en mayo, 2016, cuando se debilita el fenómeno del niño y dan inicio las lluvias acompañadas de las actividades de fertilización (Fig. 2). Hay un primer ciclo de muestreo entre el 25 de mayo (aplicación reciente de fertilizante), 1 y 9 de junio (antes y después de otra fertilización) y un muestreo el 1 de julio, ya con las lluvias establecidas y sin aplicación de fertilizante. En septiembre se presenta un receso en la intensidad de las lluvias que permite realizar otro ciclo de toma de muestras antes y después de la fertilización (12, 20 y 24 septiembre). La última aplicación de fertilizante del año se realiza en noviembre, cuando se debilitan las lluvias, y se toma el último ciclo de muestras (8, 10 y 21 noviembre).



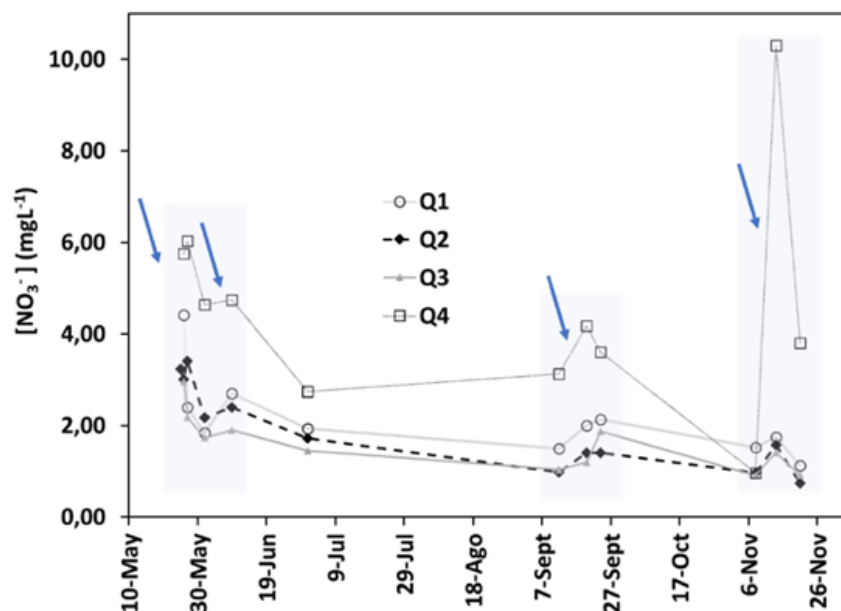


Fig. 2. Concentración de nitratos del drenaje primario Q1 y los drenajes secundarios Q2, Q3 y Q4. La toma de muestras es puntual, sin embargo, se unen los puntos para facilitar la visualización de la tendencia. Las flechas señalan días de fertilización de la finca.

Después de cada aplicación de fertilizante se observa un incremento en la concentración de nitratos en los drenajes que decae en los días posteriores. El drenaje Q4 muestra una concentración mayor que los otros drenajes, sobre todo en el periodo intenso de lluvias a final de año. Con un caudal entre $0,1-0,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, la carga de nitratos en el drenaje primario Q1 es considerablemente mayor que en los drenajes secundarios (Fig. 3). Los drenajes secundarios tienen un caudal equivalente que oscila con la intensidad de las lluvias entre $0,003-0,01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, sin embargo, Q4 presenta en todo el tiempo de monitoreo una carga de nitratos mayor que los otros dos drenajes secundarios.

Los análisis de las muestras de suelos indican una zona de clase textural franco arcillosa que se ubica entre los puntos P2, P7, P12, P13 (Fig. 1, Cuadro 1 en Apéndice digital). Los drenajes Q2 y Q3, que se encuentran hacia al norte, están ubicados ambos en suelo de clase textural arenosa o franco arenosa. El área del drenaje Q4 es de suelo de clase textural arcillosa y tiene influencia del caudal del río grande de Térraba, con lo que recibe depósito aluvial en periodos de lluvias intensas.

La variación en los drenajes secundarios de la carga de nitratos con respecto al tiempo (primera derivada de la carga de nitratos), muestra diferencias en magnitud y velocidad del cambio. En la figura 4 se muestra el cambio de la carga de nitratos en Q2 y Q4.

La hipótesis nula de esta investigación es que no hay relación entre la carga de nitratos en el agua de los drenajes agrícolas y las diferencias de clase textural del suelo. El análisis estadístico de varianza (ANOVA) de los cuatro diferentes grupos de datos, uno por cada drenaje agrícola y 11 datos por grupo, muestra una probabilidad de 0,000033 al 0,05 de significancia para prueba de la hipótesis nula. Este resultado indica que si hay una diferencia significativa entre los grupos y que la determina al menos una población de los grupos de datos. Se aplica la prueba estadística Tukey (la cual estima la diferencia honestamente significativa) para determinar el grupo estadísticamente diferente. Se obtiene que el grupo de datos del drenaje Q4, ubicado en suelo de clase textural arcillosa, es el estadísticamente diferente.

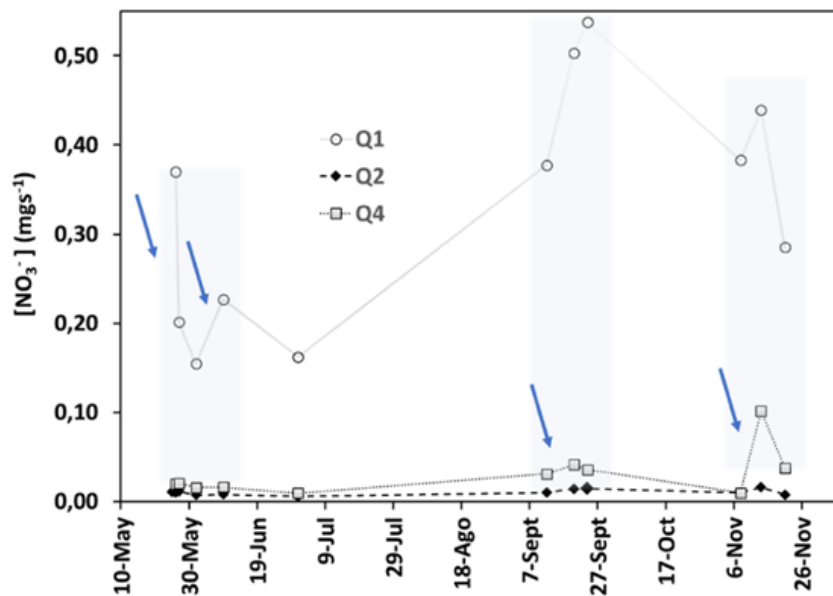


Fig. 3. Carga de nitratos (mgs^{-1}) del drenaje primario Q1 y los drenajes secundarios Q2, Q3 y Q4. La toma de muestras es tipo puntual. Se unen los datos con líneas punteadas para facilitar la visualización de la tendencia. Las flechas señalan fertilización de la finca.

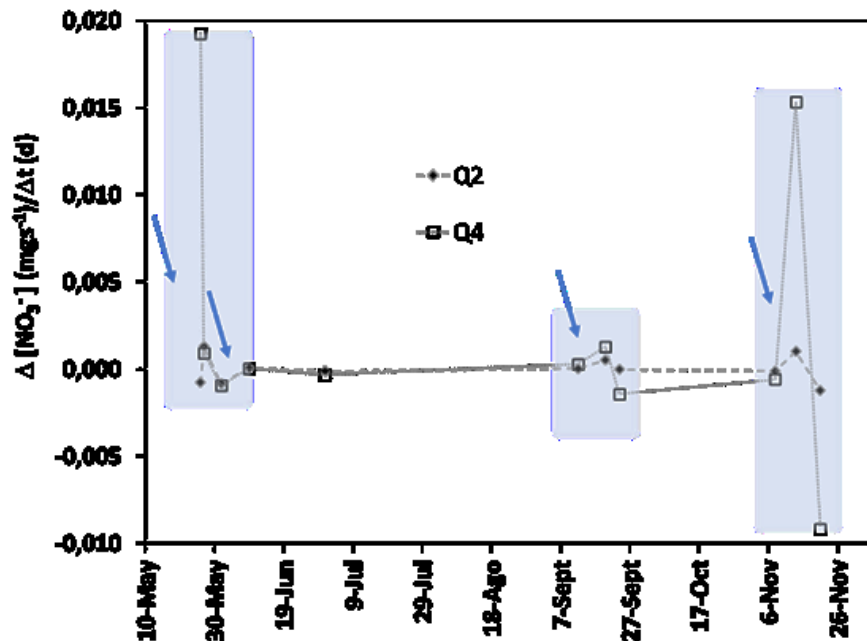


Fig. 4. Cambio de la carga de nitratos con respecto al tiempo de muestro de los drenajes secundarios, Q2 (ubicado en suelo clase textural franco arenosa) y Q4 (suelo clase textural arcillosa) de la carga de nitratos con respecto a los resultados del análisis anterior (primera derivada del monitoreo de la carga de nitratos).

El análisis elemental de suelo (Cuadro 2 en Apéndice digital) indica un suelo fértil con un nivel de contenido elemental y de nutrientes entre óptimo (adecuado) y medio (suficiente), niveles altos en calcio, hierro y manganeso que se conservan entre el inicio y el final de las lluvias. Se presenta también un bajo porcentaje de materia orgánica en toda el área de la finca.

Ya que la precipitación, la demanda nutricional y edad de la plantación, el día de aplicación, tipo, forma y cantidad aplicada de fertilizante son iguales para toda el área estudiada, en adelante se discuten sólo las variables y procesos que podrían tener una influencia en las diferencias observadas de la tendencia de los nitratos en los drenajes. Estas son la desnitrificación y la nitrificación, la clase textural de suelo, el desarrollo de las raíces de las plantas y la intensidad de la precipitación.

DISCUSIÓN

Los niveles freáticos superficiales reducen la porosidad y el porcentaje de aire del suelo y esto afecta negativamente el rendimiento, el crecimiento de las plantas y su absorción de N, P y K (Peralta-Lobo, Vásquez, Richardson, Alvarado-Hernández, & Bornemisza-Steiner, 1985). La presencia de una tabla de agua alta y fluctuante, la compactación del suelo, y una alta relación de Mg/K y bajo K se ha relacionado con enfermedades, un desarrollo pobre y menos denso de las raíces en plantas jóvenes de palma (Albertazzi & Ramírez, 2009). Sin embargo, en los análisis de nutrimentos del suelo de este estudio no se encuentra las relaciones antes mencionadas y no se registran enfermedades o un pobre desarrollo de las plantas, lo que indica que el suelo se encuentra bien drenado, los drenajes bien construidos y el estado del cultivo es saludable.

La planta de la palma aceitera tiene raíces primarias profundas cerca del tronco y un círculo de raíces de distribución horizontal. En el suelo se encuentra un gradiente creciente de nitrógeno hacia las puntas de las raíces más alejadas la planta. Esta distribución de nitrógeno se asoció con la lixiviación de nitratos por arrastre pluvial (Schroth, Rodrigues, & D'Angelo, 2000). Adicionalmente, las raíces tienen una captación de agua más alta cerca del tallo o tronco central, ligeramente inferior en los extremos de las raíces horizontales y más baja en los caminos entre las hileras del cultivo, tanto en suelos arcillosos como arenosos (Nelson et al., 2014).

Junto al arrastre pluvial, y debido a la alta solubilidad de los nitratos en agua, las diferencias en la capacidad de captación de agua pueden contribuir a explicar la distribución horizontal del nitrógeno en gradiente creciente alrededor de la planta. Sin embargo, un factor relevante para explicar las altas concentraciones de nitratos (con respecto a los otros drenajes) encontradas en el drenaje de suelo de clase textural arcillosa (Fig. 2) es la distribución vertical de la actividad de las raíces horizontales en relación con el tipo de suelo. La captación de agua y el desarrollo de las raíces de la palma está más cerca de la superficie en suelos arcillosos que en suelos arenosos (Nelson et al., 2014). Esta actividad más superficial implica que en suelo arcilloso, los procesos de asimilación de nitratos de la planta, así como la nitrificación (que es un proceso aeróbico de las capas superficiales del suelo) ocurren antes que la desnitrificación, ya que esta sucede en ambientes anaeróbicos del suelo a mayor profundidad. La menor infiltración y mayor compactación que presentan los suelos de partícula más finas como los de clase textural arcillosa no permiten la infiltración y desnitrificación en capas profundas del suelo. Por otra parte, los suelos arcillosos con alto contenido de Ca tienen una mayor capacidad de retención de la materia orgánica que los suelos arenosos (Oades, 1988). El carbón es un elemento necesario para la desnitrificación bacteriana, pero estabilizado por el suelo se convierte en un elemento no disponible para la mineralización y la desnitrificación (Castellano, Kaye, Lin, & Schmidt, 2012). Se observa poca materia orgánica y una relación C/N baja en toda la finca, particularmente baja en las zonas de suelo de clase textural franco arcillosa, condiciones que no promueven la desnitrificación (Cleveland & Liptzin, 2007; Olivares et al., 2013).

Finalmente, las distintas velocidades con que cambia la carga de nitratos en los drenajes Q2 y Q4 entre días de toma de muestra (primera derivada del monitoreo de carga de nitratos), evidencia el distinto procesamiento de los nitratos por el suelo y la planta en las zonas respectivas.



En ambos casos, los cambios positivos suceden cuando se dan eventos de fertilización, sin embargo, la magnitud de la velocidad con que cambia la carga de nitratos del drenaje de suelo clase textural arcillosa es superior a la arenosa, tanto en el momento de aplicación de fertilizante al inicio de las lluvias, como en la temporada intermedia y al final de la época lluviosa. Esto comprueba el proceso superficial de los nitratos en el suelo de clase textural franco arcillosa. Por otro lado, la velocidad con que disminuye la carga de nitratos, después del aumento inicial con la fertilización, es mucho más marcada en el drenaje de suelo de clase textural arcillosa que en el drenaje ubicado en suelo de clase textural arenosa, lo cual demuestra un gran arrastre pluvial y superficial de los nitratos en el drenaje de suelo clase textural arcillosa de alta impermeabilidad.

El mayor contenido de nitratos en el drenaje de áreas de clase textural arcillosa y suelo aluvial, la captación y asimilación superficial de los nitratos adicionados con el fertilizante, la nitrificación como posible proceso dominante y superficial en suelos arcillosos, junto con los aportes eventuales de nutrimentos por depósito aluvial, explican la observación de un mayor crecimiento y rendimiento de las plantas en estas zonas de suelo, así como su impermeabilidad se relaciona directamente con el rápido decrecimiento de la carga de nitratos con el lavado pluvial en comparación con lo que sucede en el drenaje en suelos de clase textural arenosa. Por su relación con los procesos del suelo y la planta, se recomienda el monitoreo de nitratos en los drenajes para la toma de decisiones en la gestión del fertilizante. Como ejemplos de aplicación, una alta carga de nitratos en un drenaje está relacionada con un suelo saturado, con desarrollo y captación superficial o un fuerte arrastre pluvial, lo que indicaría la recomendación de reducción en la cantidad o dosis de fertilización o bien su aplicación en condiciones menos lluviosas. Por el contrario, una baja carga de nitratos puede llevar a decidir la aplicación inmediata de fertilizante o su aplicación con el inicio de las lluvias.

De manera que la información de un monitoreo de nitratos en los drenajes puede ser utilizada para la gestión de la fertilización, siempre que se consideren las condiciones en que se desarrolla esta investigación (forma de fertilización homogénea, condiciones óptimas de nutrición, buen desarrollo y rendimiento de las plantas, buen drenaje, humedad y actividad adecuada de las raíces). Es importante la consideración de esta indicación, ya que la necesidad de aplicación o dosificación de fertilizante en este estudio no se enfoca en el requerimiento particular de nutrimentos, sino en la gestión del fertilizante y parte de condiciones óptimas del suelo. Se requieren estudios con diferentes protocolos de frecuencia, momento y dosis que sean indicadores del efecto preciso de estos cambios sobre la nutrición de la planta.

Ya que puede contribuir a una mejor administración del fertilizante, evitar impactos ambientales innecesarios y además producir un ahorro económico, el monitoreo de nitratos en drenajes superficiales agrícolas de cultivos de palma se suma a las herramientas para una gestión y desarrollo sostenible del cultivo.

AGRADECIMIENTOS

La autora y colegas que participamos en esta investigación agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación del Tecnológico de Costa Rica y a CONARE por el financiamiento para realizarla, y también a los compañeros del grupo PIPAL que ejecutó el proyecto “Tendencias, riesgos e impactos asociados al cultivo de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el Pacífico Sur, como insumo para la previsión de prácticas y políticas que promuevan una producción sustentable y segura en Costa Rica (PIPAL-Sur)”, por el trabajo amplio e integral realizado en la zona del cantón de Osa, y del cual forma parte el objetivo detallado de la presente investigación.



REFERENCIAS

- Addiscott, T. M. (1996). Measuring and modelling nitrogen leaching: parallel problems. *Plant and Soil*, 181, 1-6. DOI: 10.1007/BF00011284
- Albertazzi, H., & Ramírez, C. (2009). Soil characteristics and root development in young oil palms (*Elaeis guineensis* Jacq.) planted in sites affected by bud rots (pudrición del cogollo). *ASD Oil Palm Papers*, 33, 1-14.
- Annandale, J. G., Preez, C. C. du, Stirzaker, R. J., Thorburn, P. J., Bristow, K. L., & van der Laan, M. (2013). Modelling nitrogen leaching: Are we getting the right answer for the right reason? *Agricultural Water Management*, 133, 74-80. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.10.017
- Boons, F., & Mendoza, A. (2010). Constructing sustainable palm oil: How actors define sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 18(16-17), 1686-1695. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.07.003
- Castellano, M. J., Kaye, J. P., Lin, H., & Schmidt, J. P. (2012). Linking carbon saturation concepts to nitrogen saturation and retention. *Ecosystems*, 15(2), 175-187. DOI: 10.1007/s10021-011-9501-3
- CIA (Centro de Investigaciones Agronómicas). (2016). Mapa digital de suelos de Costa Rica. San José, CRI: CIA. Recuperado de http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139
- Cleveland, C. C., & Liptzin, D. (2007). C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 85(3), 235-252. DOI: 10.1007/s10533-007-9132-0
- Colchester, M., Chao, S., Fon Achobang, C., Alaza, L., Ale, N., Anderson, P., ... Priyani Widjaya, A. (2013). *The Oil Palm Sector at a Crossroads Conflict or Consent*. Retrieved from <http://www.forestpeoples.org/sites/fpp/files/publication/2013/11/conflict-or-consentenglishlowres.pdf>
- Cunha, E. J., De Assis Montag, L. F., & Juen, L. (2015). Oil palm crops effects on environmental integrity of Amazonian streams and Heteropteran (Hemiptera) species diversity. *Ecological Indicators*, 52, 422-429. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.12.024
- Dislich, C., Keyel, A. C., Salecker, J., Kisel, Y., Meyer, K. M., Auliya, M., ... Wiegand, K. (2017). A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system. *Biological Reviews*, 92(3), 1539-1569. DOI: 10.1111/brv.12295
- Dubos, B., Snoeck, D., & Flori, A. (2017). Excessive use of fertilizer can increase leaching processes and modify soil reserves in two ecuadorian oil palm plantations. *Experimental Agriculture*, 53(2), 255-268. DOI: 10.1017/S0014479716000363
- Duran, N. & Ortiz, R. (1995). Efecto de algunas propiedades físicas del suelo y la precipitación sobre la producción de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en Centroamérica. *Agronomía Mesoamericana*, 6, 7-14., 7-14. DOI: 10.15517/AM.V6I0.24802
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., ... Amann, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 368, 20130164. DOI: 10.1098/rstb.2013.0164
- Gallmetzer, N., & Schulze, C. H. (2015). Impact of oil palm agriculture on understory amphibians and reptiles: A Mesoamerican perspective. *Global Ecology and Conservation*, 4, 95-109. DOI: 10.1016/j.gecco.2015.05.008
- Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., ... Sutton, M. A. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320(5878), 889-892. DOI: 10.1126/science.1136674
- Hernández-Alpizar, L., & Coy-Herrera, R. (2015). Cuantificación de nitratos en agua potable para análisis en línea. *Tecnología en Marcha*. 28, 86-93. DOI: 10.18845/tm.v28i4.2446



- Hoffmann, M. P., Donough, C. R., Cook, S. E., Fisher, M. J., Lim, C. H., Lim, Y. L., ... Oberthür, T. (2017). Yield gap analysis in oil palm: Framework development and application in commercial operations in Southeast Asia. *Agricultural Systems*, 151, 12-19. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.11.005
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales* (1^{ed}). San José, Costa Rica: INEC.
- Khatun, R., Reza, M. I. H., Moniruzzaman, M., & Yaakob, Z. (2017). Sustainable oil palm industry: The possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(August 2016), 608-619. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.077
- Konopik, O., Gray, C. L., Grafe, T. U., Steffan-Dewenter, I., & Fayle, T. M. (2014). From rainforest to oil palm plantations: Shifts in predator population and prey communities, but resistant interactions. *Global Ecology and Conservation*, 2, 385-394. DOI: 10.1016/j.gecco.2014.10.011
- Nainar, A., Chey, V. K., Aldridge, D. C., Walsh, R. P. D., Foster, W. A., Reynolds, G., ... Bidin, K. (2016). The effects of catchment and riparian forest quality on stream environmental conditions across a tropical rainforest and oil palm landscape in Malaysian Borneo. *Ecohydrology*, 10(4), e1827. DOI: 10.1002/eco.1827
- Nelson, P. N., Webb, M. J., Banabas, M., Nake, S., Goodrick, I., Gordon, J., ... Dubos, B. (2014). Methods to account for tree-scale variability in soil- and plant-related parameters in oil palm plantations. *Plant and Soil*, 374(1-2), 459-471. DOI: 10.1007/s11104-013-1894-7
- Oades, J. M. (1988). The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 5(1), 35-70. DOI: 10.1007/BF02180317
- Olivares, J., Bedmar, E. J., & Sanjuán, J. (2013). Biological Nitrogen Fixation in the Context of Global Change. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 26(5), 486-494. DOI: 10.1094/MPMI-12-12-0293-CR
- Owens, P. R., Whisler, F. D., Jenkins, J. N., Thomasson, J. A., & Iqbal, J. (2005). Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1338. DOI: 10.2136/sssaj2004.0154
- Pardon, L., Bockstaller, C., Marichal, R., Sionita, R., Nelson, P., Gabrielle, B., ... Bessou, C. (2016). Modelling potential nitrogen losses in oil palm plantations with IN-Palm, an agri-environmental indicator. *Environmental Modelling and Software for Supporting a Sustainable Future*, 445-552. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/320988871_Modelling_potential_nitrogen_losses_in_oil_palm_plantations_with_IN-Palm_an_agri-environmental_indicator
- Pardon, L., Ian Huth, N., Netelenbos Nelson, P., Banabas, M., Gabrielle, B., & Bessou, C. (2017). Yield and nitrogen losses in oil palm plantations: Main drivers and management trade-offs determined using simulation. *Field Crops Research*, 210(May), 20-32. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.016
- Peralta-Lobo, F., Vásquez, O., Richardson, D. L., Alvarado-Hernández, A., & Bornemisza-Steiner, E. (1985). Effect of some soil physical characteristics on yield, growth and nutrition of the oil palm in Costa Rica. *Oléagineux*, 40(8/9), 423-430.
- Pirker, J., Mosnier, A., Kraxner, F., Havlík, P., & Obersteiner, M. (2016). What are the limits to oil palm expansion? *Global Environmental Change*, 40, 73-81. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.06.007
- Reza, S. K., Nayak, D. C., Chattopadhyay, T., Mukhopadhyay, S., Singh, S. K., & Srinivasan, R. (2016). Spatial distribution of soil physical properties of alluvial soils: a geostatistical approach. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(7), 972-981. DOI: 10.1080/03650340.2015.1107678
- Rist, L., Feintrenie, L., & Levang, P. (2010). The livelihood impacts of oil palm: Smallholders in Indonesia. *Biodiversity and Conservation*, 19(4), 1009-1024. DOI: 10.1007/s10531-010-9815-z
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., ... & Nykvist, B. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472. DOI: 10.1038/461472a



- Román-Forastelli, M., & Angulo-Aguilar, J. E. (2013). *Panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito: tendencias y desafíos para el desarrollo sostenible. Iniciativa Osa y Golfito*. Stanford University: INOGO, Stanford Woods Institute for the Environment.
- Schroth, G., Rodrigues, M. R. L., & D'Angelo, S. (2000). Spatial patterns of nitrogen mineralization, fertilizer distribution and roots explain nitrate leaching from mature Amazonian oil palm plantation. *Soil Use and Management*, 16(3), 222-229. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2000.tb00197.x
- SEPSA. (2016). *Boletín Estadístico 2016*. Retrieved from <http://www.infoagro.go.cr/BEA/BEA26/BEA26.pdf>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Folke, C. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. DOI: 10.1126/science.1259855
- Solano, J. & Villalobos, R. (2000). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- United States Department of Agriculture (USDA). (2017). *World Agricultural Production. Circular Series*. Retrieved from <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>
- Van der Laan, M., Stirzaker, R. J., Annandale, J. G., Bristow, K. L., & Preez, C. C. (2010). Monitoring and modelling draining and resident soil water nitrate concentrations to estimate leaching losses. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1779-1786. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.06.012
- Walsh, R. P. D., Nainar, A., Bidin, K., Higton, S., Annammala, K. V, Blake, W., ... Hanapi, J. (2016). Hydrogeomorphological and water quality impacts of oil palm conversion and logging in Sabah, Malaysian Borneo: a multi-catchment approach. *Geophysical Research Abstracts*, 18(4), EGU2016-18195. Retrieved from <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-18195.pdf>
- Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2017). Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. *European Journal of Agronomy*, 83, 57-77. DOI: 10.1016/j.eja.2016.11.002

