

Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica

Recibido: 1 de marzo de 2016. Aceptado en versión final: 26 de septiembre de 2016.

Publicado en línea (versión e-print): 21 de marzo de 2017.

Gabriel Garbanzo-León¹

Bryan Alemán-Montes²

Alfredo Alvarado-Hernández²

Carlos Henríquez-Henríquez²

Resumen: Con el fin de validar los modelos geoestadísticos y convencionales generados a partir de una base de análisis químicos de suelos, se realizó un meta-análisis de los datos y se estimó el semivariograma de mejor ajuste para utilizar el método de interpolación Kriging, que permitió representar la variabilidad espacial de la fertilidad de los suelos, de uso agropecuario, de una parte de la región Pacífico Sur de Costa Rica. Para ello se utilizó una base de datos de análisis químicos de suelos disponible y proveniente de los cantones de Corredores, Golfito y Osa, los cuales están ubicados en la región antes mencionada de Costa Rica. Las áreas que se seleccionaron para el presente estudio, estuvieron dedicadas a los cultivos de palma aceitera, arroz, forestales y otros que fueron denominados como “cultivos varios”. El área está conformada fundamentalmente por suelos de origen aluvial en las partes bajas y suelos más desarrollados en las zonas de piedemonte; dentro del área dominan suelos del orden inceptisol, ultisol, entisol y una pequeña mancha de andisol. Para la investigación se eligieron los valores obtenidos en las variables pH, acidez intercambiable, Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe y Mn, a los cuales se les realizó análisis de frecuencias, separaciones de medias, correlaciones y análisis de componentes principales (CP). Posteriormente se interpolaron los valores de las variables elegidas mediante el método de Kriging ordinario, continuadamente se realizaron 4 tipos

de validaciones de la interpolación entre estas: validación de campo, validación cruzada y se procedió a calcular los errores para cada validación de las interpolaciones, estos errores se le restaron al valor original de cada observación para generar una nueva interpolación y realizar de nuevo una validación de campo y una validación cruzada. Los resultados de las interpolaciones se analizaron mediante el promedio absoluto del error (PAE), promedio del cuadrado del error (PCE), efectividad de predicción (E) y determinación (r^2). Los resultados demostraron un alto coeficiente de variación principalmente para la acidez intercambiable, y los nutrientes Mg, K, P, Zn, Cu Fe y Mn. El análisis de frecuencia mostró que todos los nutrientes poseen distribuciones anormales y tendencias entre los percentiles 25 y 75, sin embargo, el pH mostró una distribución normal. Al separar estadísticamente las medias de los valores en los nutrientes según cada cultivo, se encontró que en los suelos dedicados al cultivo del arroz determinó el mayor contenido de pH (6,0), Ca (26,8 cmol (+) L⁻¹), Mg (10,6 cmol (+) L⁻¹) y Mn (34,2 mg L⁻¹), mientras que los dedicados al cultivo de palma aceitera mostraron mayor concentración en la acidez intercambiable (0,5 cmol (+) L⁻¹), K (0,8 cmol (+) L⁻¹), P (13,1 mg L⁻¹), Zn (2,8 mg L⁻¹) y Fe (99,8 mg L⁻¹) significativamente ($\alpha = 0.05$). Entre las correlaciones según la prueba de Spearman se encontró relaciones proporcionales

¹ Universidad de Costa Rica Sede Guanacaste, Liberia, Guanacaste, Costa Rica. teléfono: 88627817.

jgabriel.garbanzo@gmail.com. Autor para correspondencia

² Centro de Investigaciones Agronómicas Universidad de Costa Rica San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. bryanaelemancr@gmail.com; alfredo.alvarado@ucr.ac.cr; carlos.henriquez@ucr.ac.cr. Teléfono: 2511 2070

entre las bases Ca, Mg, y K y una correlación inversamente proporcional entre el pH y Acidez intercambiable y K y P en los suelos. El resto de manejos tuvieron valores intermedios y muy variables. El análisis de CP explicó un 60.8% de la variación de los nutrientes en el pacífico sur, donde se encontró una relación entre los cultivos forestales y cultivos varios entre las dimensiones CP1 y CP2, el cual relacionó el comportamiento de K y P con palma aceitera y el pH con Arroz. En las dimensiones CP2 y CP3 mostró una relación de Fe y Cu con palma aceitera y pH con cultivos varios. Se determinó que la acidez, pH y los contenidos de Mg y K asimilable, se relacionaron fuertemente de acuerdo al manejo nutricional que es característico de cada cultivo y particularmente el contenido de Ca, dependió principalmente a la génesis del suelo. La validación de las interpolaciones en los nutrientes determinó que los parámetros PAE, PCE, E y r^2 mostraron mayor precisión al restar el error de las interpolaciones, mejorándose sustancialmente la predicción. Por

otro lado, la validación cruzada, luego de restar los errores de interpolación, mostró el mejor ajuste de interpolación en comparación a validación de campo y ambas validaciones, mejor estimación que sin la resta de los errores en la distribución de nutrientes en los suelos aluviales de la costa del Pacífico Sur. Se concluye que la información de los mapas construidos a partir de las interpolaciones realizadas, representó de muy buena manera la variabilidad espacial nivel regional de las variables evaluadas, lo cual confirma que esta herramienta es funcional para trabajos importantes en el desarrollo de diagnóstico de problemas de nutrientes en los suelos o bien condiciones de fertilidad para la región de estudio y otras regiones donde se cuente con información de suelos espacialmente referenciada.

Palabras claves: Interpolación, Kriging, Validación, Nutrientes, Suelos.

Statistical and conventional validation models in determining the spatial variation of soil fertility South pacific Costa Rica

Abstract: The study validates geo-statistical and conventional models for a soil fertility data set of the South Pacific agricultural lands in the coastal plains of Costa Rica. A meta-analysis was conducted and a best adjustment semi-variogram employed to allow using Kriging interpolation. Statistical analysis included frequency distribution, means estimates, correlations and principal components analysis (CP). Values of selected variables were interpolated by ordinary Kriging following four consecutive validation types: field validation, cross validation, errors calculated for each interpolation of validations, subtraction of errors from original data observations, generation of a new field validation, and subsequent cross validation. Interpolations results were analyzed using error absolute average (PAE), error mean square (PCE), prediction affectivity (E) and determination (r^2). The data set included soil available information of the counties Corredores, Golfito and Osa previously planted to oil palm, rice, forest and few other crops (named "cultivos varios"). Soils are mainly of alluvial origin in lower positions but with a little more development in the distal part of the hillsides, to include mainly Inceptisols, Ultisols, Entisols and a few Andisols. Variables investigated include pH, exchangeable acidity, Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe and Mn. Results shows high variation coefficients mainly for exchangeable acidity and availability of Mg, K, P, Zn, Cu Fe y Mn. Frequency analysis demonstrated abnormal distributions for all elements and tendencies between 25 and 75 percentiles however but normal for pH values. Mean values of variables by crops showed higher numbers under rice plantations pH (6.0), Ca (26.8 cmol (+) L⁻¹), Mg (10.6 cmol (+) L⁻¹) and Mn (34.2 mg L⁻¹). Values for oil palm plantations were significantly higher ($\alpha = 0.05$) for exchangeable acidity

(0.5 cmol (+) L⁻¹), K (0.8 cmol (+) L⁻¹), P (13.1 mg L⁻¹), Zn (2.8 mg L⁻¹) y Fe (99.8 mg L⁻¹). Spearman correlation analysis found proportional relationships between Ca, Mg, and K and inverse proportional correlation between pH y exchangeable acidity and soil available K and P. Other crops ("cultivos varios") showed highly variable intermediate values. CP analysis explained 60.8% of nutrients variability in the study area with a relation between forest and other crops among CP1 and CP2 dimensions, probably related to the behavior of K and P under oil palm pH in rice fields. A relationship was also found among dimensions CP2 and CP3 for Fe and Cu under oil palm and pH under other crops. It was determined that soil acidity, pH and availability of Mg and K were strongly related to the nutritional management practices of the different crops and that of Ca particularly to the soil genesis on calcareous materials. Nutrients interpolation validation determined that PAE, PCE, E and r^2 values improved prediction after removing interpolation errors. Cross validation after substraction of interpolation errors showed the best interpolation adjustment as compared to field validation and both validations, and better estimation not subtracting nutrients distribution errors in the alluvial coastal plains of the South Pacific Costa Rica. It is concluded that the information provided by the maps build after interpolations well represent the special variability of the evaluated variables. This confirm that the tools employed is functional to develop relevant works in the diagnosis of nutrient problems in soils or soil fertility conditions for a region and other similar with spatially referenced soil data.

Key words: Interpolation, Kriging, Validation, Soil Nutrients.

INTRODUCCIÓN

Herramientas estadísticas para agrupamientos

La fertilidad de los suelos es uno de los factores más importante en la nutrición mineral de los cultivos por lo que es esencial su entendimiento para brindar un mejor manejo de su nutrición. Sin embargo, entre las problemáticas que existen en la interpretación de análisis de suelos, en especial en una unidad de manejo o región, se encuentra su propia variabilidad, la cual está influenciada directamente por el comportamiento o dinámica nutricional que sufren los nutrientos in-situ y fuertemente correlacionada con la génesis de los suelos y su manejo (Alvarado, 1985; Kass 1996, Bertsch, 1998; Sposito, 2008).

El estudio de la fertilidad de los suelos se desarrolla principalmente a nivel local o de unidades de manejo integradas a mediana escala. En Costa Rica los terrenos y fincas productoras de cultivos agrícolas son generalmente pequeñas (entre 0.5 y 100 ha) y se dividen en unidades de manejo catalogados en lotes, sectores, fincas o comités. Es posible que la diferenciación in situ de los nutrientos en los análisis químicos de suelos no sea influenciada por la variación que existe en un sistema pequeño y puedan darse mejores recomendaciones ampliando la escala de análisis. No obstante, cuando se evalúan unidades de manejo de mayor proporción, la incertidumbre aumenta debido a que se incluyen factores de diferenciación que intervienen en la interpretación, entre las que se encuentran: la relación que existe entre la génesis de los suelos, el manejo de los cultivos, los muestrazos para análisis químicos, la preparación de la muestra y los rangos de variación en el laboratorio. Donde la interpretación de los contenidos nutricionales a nivel regional se torne menos asertiva, se puede estudiar el comportamiento a gran escala y tomar en consideración la variación temporal de las observaciones.

El análisis estadístico de meta análisis se fundamenta en un conjunto de herramientas que sintetiza los datos de una base o grupo, evaluando el comportamiento de los datos, la diferencia media y las correlaciones entre las distintas variables. Esto permite evaluar y predecir el comportamiento del

sistema suelo (Letón y Pedromino, 2001; Botella y Gambara, 2002; Huedo y Johnston, 2010) y el agrupamiento de variables del lugar frente al rendimiento de especies, por ejemplo, forestales (Granados, 2014). Este tipo de análisis complementado con el análisis estadístico multivariado, posibilita estimar la contribución de un grupo de variables hasta reducirlas a su menor número sin perder poder estadístico, tal es el caso del análisis de componentes principales que reduce la dimensionalidad de un conjunto de observaciones (Álvarez, 1994; Serrano 2003; Jolliffe, 2005; Guisye, 2006; Abdi y Williams, 2010; Córdoba *et al.*, 2012). Aplicar un meta análisis de la fertilidad de los suelos en la zona Pacífico Sur de Costa Rica permitiría hacer un manejo más sistemático de sus suelos.

La integración de los modelos geoestadísticos en el estudio de las variables de suelo brinda una herramienta importante para la interpretación del comportamiento en el meta análisis, máxime cuando las observaciones presentan auto correlación espacial, deseable desde el punto de vista geoestadístico. El uso de interpoladores posibilita analizar distribuciones y variaciones espacio-temporales de observaciones, basadas en el análisis de dependencia espacial entre valores de una variable medida en sectores vecinos con el fin de generar estimaciones en otras posiciones dentro de la región estudiada (Pose *et al.*, 2001, Conesa y Bautista, 2004; Peña, 2006). Los interpoladores espaciales utilizan una diversidad de métodos para la estimación; sin embargo, una de las más utilizadas es el Kriging desarrollado por Matheron y Krige (citados por Burrough, 1985). Su principio básico radica en función de la estimación de observaciones que utiliza un modelo de variogramas para la predicción de sitios, con el fin de proveer el mejor estimado lineal imparcial en una distribución espacial (Peña, 2006; Stein, 2012; Pyrcz y Deutsch, 2014). Villatoro y colaboradores (2008) concluyeron que la aplicación del método de interpolación Kriging en la predicción de parámetros de fertilidad de suelos, bajo condiciones específicas, posee una mayor efectividad en la predicción en comparación con el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting). Además, este método permite predecir con buen

grado de acierto la variabilidad espacial de la fertilidad de los suelos a escala regional, según lo que menciona Henríquez *et al.* (2013) al evaluar algunas variables de fertilidad en el suelo.

Estas técnicas de interpolación pueden validarse mediante en campo y a través de la validación cruzada. La primera consiste en comparar las observaciones interpoladas con observaciones nuevas obtenidas en campo posterior al análisis geoestadístico; de la misma manera, entre más similares se presenten los valores más efectividad existe en la predicción (Henríquez *s.*, 2013; Bonet, 2014). La validación cruzada consiste en comparar un porcentaje de las observaciones reales con las observaciones interpoladas; entre más similares sean estos valores existe un aumento en la efectividad de predicción (Mateu y Morrell, 2003; Henríquez *et al.*, 2013)

Relieve y suelos de la región de estudio

No existe un trabajo que contemple en su totalidad los tipos de relieve y suelo de la región del Pacífico Sur de Costa Rica, aunque sí de algunas de sus subregiones. Los pocos estudios existentes se han realizado por métodos convencionales de mapeo empleando fotografías aéreas y separando regiones fisiográficas (Bergoeing, 1978; Más 1981; Tahal, 2000; Scheucher *et al.*, 2008). Al caracterizar la fertilidad de los suelos de la región bajo estudio Berstch (1986) y Méndez y Berstch (2012) unieron las propiedades del suelo comparadas utilizando unidades político administrativas de Costa Rica (cantones). López y Solís (1992) y Flores (2001) comparan la disponibilidad de los nutrientes en los suelos de bloques de producción de banano con rendimiento creciente de la zona de estudio y mencionan que para los suelos dedicados a dicho cultivo en el sector Palmar-Chacarita, los rangos de las variables edáficas oscilaron entre pH 4.8-7.7, saturación de acidez 0-5 %, de 18.8-50.2 de Ca, 5.6-8.7 de Mg, 0.3-2.2 de K (en cmol(+) L⁻¹) y entre 4-5 de P, 29-211 de Fe, 6-299 de Cu, 1-4 de Zn y 4-49 de Mn (en mg L⁻¹). Granados (2014), utilizando el análisis de regresión entre las variables morfodasométricas y las variables edáficas, encontró que en la zona sur de Costa Rica 58% del área

con alto potencial para plantar teca corresponde a zonas con pendientes de 0-2% y 42% en el sector Palmar-Chacarita y del 2-15% en el sector La Palma-Puerto Jiménez y con niveles de productividad media en el sector denominado “Corredores” en el presente trabajo.

El análisis de los nutrientes a escala regional contempla una alta variabilidad en los contenidos nutricionales (Vanmechelen *et al.*, 1997). La influencia directa de los distintos factores formadores de suelo dotaría de sostenibilidad y liberación de los distintos nutrientes, posiblemente atribuida a los procesos de formación de cada suelo (Alvarado, 1985, Buol, 2003, Alvarado *et al.*, 2014). En Costa Rica los suelos de la Zona Pacífico Sur tienen una variada geomorfología, condiciones climáticas, alto riesgo de inundaciones, el bajo y reciente relieve en una región sujeta a cambios tectónicos frecuentes y de vulcanismo moderno conllevan a la formación de suelos recientes (en su mayoría de menos de 1 000 años) influenciada por actividades humanas, entre estas: drenaje, nivelación y adición de agroquímicos, que permite la formación principalmente de Inceptisoles, Ultisoles, Andisoles y Entisoles (Mata *et al.*, 2013).

Los objetivos de este trabajo fueron realizar un meta análisis de la fertilidad de los suelos en la región Pacífico Sur de Costa Rica, determinar las causas de variabilidad en el sistema y estimar el mejor ajuste de interpolación para representar la variabilidad espacial de la fertilidad de los suelos de la región.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en la zona Pacífico Sur de Costa Rica, que comprende los cantones de Corredores, Golfito y Osa, entre las coordenadas geográficas 8° 16' y 8° 59' de latitud Norte, 82° 50' y 83° 37' de longitud Oeste (Figura 1). Los suelos estudiados son de uso agrícola, principalmente sembrados con palma aceitera, arroz, especies forestales y con distintos cultivos (denominados “cultivos varios” en el resto del documento), todos en una topografía variable entre 10 y 200 m.s.n.m. de la zona baja del Pacífico Sur que recibe una precipitación promedio anual de 4 954 mm (IMN, 2008).

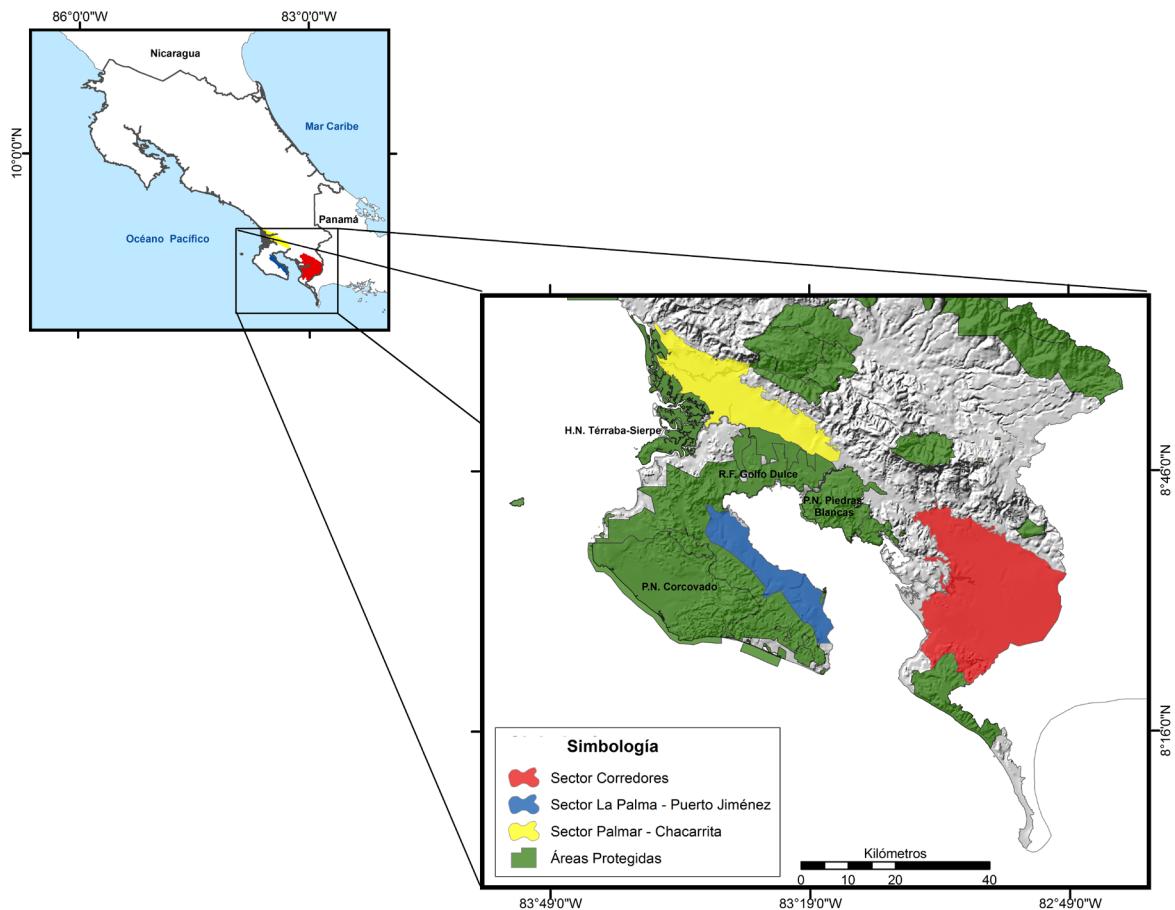


Figura 1. Mapa de divisiones agrícolas de estudio especificados por sector Corredores, Sector La Palma-Puerto Jiménez y Palmar-Chacarita en la parte baja de la región Pacífico Sur de Costa Rica.

El área de estudio comprendió las geoformas de la Llanura Diquís-Coto Colorado (denominado en el estudio sector Palmar-Chacarita), que consiste en una vasta depresión ubicada al pie de la fila Costanera o fila de Cal (Ulloa *et al.*, 2011) y es el resultado de la deposición de materiales aluviales de los conos aluviales de los ríos Téraba, Coto, Corredores, Esquinas y Sierpe y en Coto Colorado son el resultado de la transgresión flandense y de la colmatación fluvial, eventos todos ocurridos durante el Cuaternario, intercalados con pequeñas colinas que forman conjuntos compactos de rocas sedimentarias (especialmente calcáreas) y la fila Golfito. Los suelos aluviales dominantes se clasifican Typic Eutrudepts y Fluvaquentic Eutrudepts cuando el drenaje natural no alcanza a ser pobre.

Los suelos presentan predominantemente texturas medias y entre más cercanos a las montañas y colinas es posible encontrar en ellos piedras y gravas, y en algunos casos problemas de aireación asociados a compactación superficial. Los suelos son ligeramente ácidos a casi neutros (5.5-6.7), tienen alta saturación de bases (64-67%), niveles de Ca altos (20-37 cmol (+) L⁻¹), medios de Mg (3.1-1.8 cmol (+) L⁻¹) y bajos de K (0.2-1.0 cmol (+) L⁻¹). Los contenidos de P y de Zn normalmente son bajos ($tr\text{-}4$ y 1-2 mg L⁻¹, respectivamente) y algunos de estos suelos aún contienen cantidades elevadas de Cu residual de las aplicaciones del elemento en las plantaciones bananeras. Cuando los suelos se fertilizan, como es el caso de las plantaciones de palma aceitera, los niveles de P pueden suelen ser

altos ($30\text{-}35 \text{ mg L}^{-1}$) y lo mismo sucede con el contenido de K disponible en el suelo ($1.0\text{-}1.5 \text{ cmol (+) L}^{-1}$); algunas enfermedades de la palma aceitera han sido asociadas a la deficiencia de Mg en el valle de Coto (Ramírez, 2008).

También se estudió el Abanico Diluvial de Paso Canoas (denominado sector Corredores en el estudio) formado a partir materiales eyectados por los volcanes Barú, Cotón, Pelona y Bola (López, 1978; Barquero y Sáenz, 1987) en forma de corrientes de lodo y posteriormente depositados en aluviones durante el Pleistoceno (fecha) por los ríos Chirripó Viejo y Coloradito (Madrigal y Rojas, 1980). Contienen abundantes sedimentos de caliza y de rocas volcánicas de tipo andesítico en una matriz arcillo-arenosa; aquí es la deposición de cenizas volcánicas recientes la que influye en la formación de Andisoles asociados con Inceptisoles (Más, 1981; Mata *et al.*, 2013). Los suelos dominantes de esta unidad se clasifican Lithic, Typic y Aquic Hapludands (TAHAL, 2000), de los cuales los primeros dominan en la parte apical del abanico y los últimos en la parte distal. La capacidad de uso está limitada por la poca profundidad efectiva debido a la ocurrencia de un contacto paralítico entre 30 y 90 cm, su baja fertilidad natural y en algunos casos el mal drenaje (TAHAL, 2000; Pedrosa, 1995). Son de reacción ligeramente ácida ($\text{pH } 5.5\text{-}5.8$); el pH en NaF oscila entre 11.1 y 11.6, reflejando su alta capacidad de retención de fosfatos; los niveles de Ca (2.1), Mg (0.7-1.0) y K (0.1) cmol (+) L⁻¹, respectivamente, son bajos, al igual que la capacidad de intercambio de cationes efectiva ($1.5\text{-}4.0 \text{ cmol (+) L}^{-1}$). Originalmente, estos suelos se utilizaron en ganadería extensiva y más recientemente se cultivan con melina (*Gmelina arborea*) y palma aceitera (*Elaeis guineensis*); estos suelos tienen poco potencial para la plantación de teca. En la llanura aluvial de inundación de los Cotos los suelos dominantes son Aeric Endoaquepts y Fluventic Eutrudepts, con problemas de drenaje y profundidad efectiva. Los suelos se caracterizan por presentar problemas de reducida profundidad efectiva y pedregosidad, propiedades que aunadas a las lluvias copiosas de la región causan mal drenaje en algunas situaciones y que se asocian a un nivel freático fluctuante, compactación superficial, una

estructura débil y texturas contrastantes dentro del perfil (Más, 1981). Debido a la condición de drenaje, el uso de estos suelos se limita al cultivo de arroz en las áreas de drenaje muy pobre, a la palma aceitera cuando el drenaje es imperfecto a bueno, a ganadería estacional en tierras bajas con drenaje pobre y al cultivo del banano en suelos en los que el drenaje natural es moderado y bueno.

La última región estudiada fue la Llanura Costera (denominado sector La Palma–Puerto Jiménez en el estudio), la cual se localiza en la costa interna de la península de Osa desde Rincón hasta la Punta de Matapalo (Madrigal y Rojas 1980) y consiste de pequeños abanicos aluviales depositados con paleo terrazas del río Tigre y otros afluentes (MAG, 1980; Gómez y Chinchilla, 2005). Está compuesta por un relleno fluvio-lacustre cerca del pie de las colinas y puede presentar algo de influencia marina cerca de la costa en áreas pantanosas en las cuales todavía quedan restos salinos (Holdridge *et al.*, 1971). Los fragmentos dominantes cerca del pie de monte son de roca sedimentaria (areniscas y lutitas) con abundantes piezas de roca básica (basalto) y hasta fragmentos de caliza silícea; los fragmentos en el resto de la llanura consisten de fracciones finas de limos y arcillas, con algunos lentes de arena. Janzen (1991) divide los suelos en esta región en: bien drenados, oscuros, fértiles y profundos (Udolls, Ustolls y Udepts) y suelos pantanosos cercanos a la costa y en manglares (Aquents).

Los análisis químicos de suelos utilizados en el presente trabajo provienen de bases de datos de empresas privadas, cooperativas y productores independientes de la zona obtenidas entre los años 2001 y 2013; las muestras fueron tomadas de los primeros 30 cm de profundidad, en diferentes épocas del año por personal de cada una de las entidades. Los análisis químicos de las muestras se realizaron con la extracción por los métodos de KCL-Olsen modificado y Mehlich 3; los análisis extraídos con Mehlich 3 se trasformaron a datos extraídos mediante KCL-Olsen utilizando las ecuaciones de mejor ajuste descritas por Bertsch *et al.* (2005). Los 1 185 análisis inicialmente recolectados se sometieron a una preselección o filtro de acuerdo a la presencia de análisis incompletos, falta de coordenadas geográficas, errores de digitación en

las bases de datos y datos con concentraciones anormales, quedando finalmente un total de 711 análisis de suelos, con los que se realizó un segundo filtro, mediante el programa ArcGIS 10.1, con el cual se evaluaron y eliminaron datos fuera del área de estudio y coordenadas clonadas o repetidas, quedando un total de 574 análisis de suelos. El total de análisis se distribuyó en los distintos cultivos mostrando un subtotal de 310 en palma aceitera, 134 en arroz, 89 en forestales y 41 en cultivos varios, todos generados durante el periodo de 2008 y 2013.

Meta-análisis de nutrientes

Se analizó el comportamiento de la variación de pH, acidez, Ca, Mg K, P, Zn Cu, Fe y Mn disponibles en el suelo superficial por cultivo en el Pacífico Sur mediante un meta-análisis y un análisis de frecuencia para ver la distribución de las variables edáficas. Posteriormente las variables se sometieron a pruebas de Shapiro Wilk para estimar la normalidad de los datos y realizar separaciones entre medias para cada cultivo, según la prueba de Kruskal Wallis. Para explicar la variabilidad del sistema se procedió a realizar un análisis multivariado, sometiendo los datos a correlaciones según la prueba de Spearman y mediante un análisis de componentes principales (CP) (Gonzalo *et al.*, 2008; Jaramillo *et al.*, 2011, Córdoba *et al.*, 2012), con el fin de encontrar una posible estructura en la base de datos y explicar la variación según las dimensiones calculadas. Los cálculos fueron realizados mediante el programa estadístico R studio versión 0.98.1091.

Análisis geoestadístico y validación

El análisis geoestadístico se realizó para los datos localizados dentro de las áreas de interés pre establecidas en la región Pacífico Sur. Se separaron y distribuyeron los análisis de suelos en tres sectores según su cercanía a las zonas de interés y auto correlación espacial entre los mismos en 68 análisis en Puerto Jiménez, 80 análisis de suelos para Palmar y 426 en Coto para un total de 574 análisis de suelos. Posteriormente se realizó una delimitación de las zonas de influencias predictivas para cada división, se catalogaron en áreas de trabajo y se delimitaron por áreas protegidas, curvas de nivel, límites marítimos, humedales y

límites fronterizos con Panamá. El área de trabajo para la estimación de las variables nutricionales fue representada por un total de 124 152 ha.

Los análisis de suelos localizados dentro de las divisiones Jiménez, Palmar y Coto se sometieron a un análisis geoestadístico exploratorio para determinar los modelos de mejor ajuste para cada variable. Las concentraciones de nutrientes fueron separadas en una variable Z (datos nutricionales) con las respectivas coordenadas planas X, Y, para evaluar las auto-correlaciones espaciales inherentes de los datos. Los datos fueron procesados mediante el programa GS+ Geostatistic for Environmental Science (versión 9) donde se analizaron los semivariogramas y se estimó el modelo con el mejor ajuste (r^2) (Cuadros 1, 2 y 3). Una vez establecidos los modelos de ajustes para las variables Z las mismas se interpolaron por el método de Kriging ordinario empleando el programa ArcGis 10.1 (Ecuación 1):

$$(1) \quad \hat{z}(s_o) = \sum \lambda_i z(s_i)$$

donde $Z(s_i)$ es el valor medido en una ubicación i ; λ_i es una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i . s_o la ubicación de la predicción y n la cantidad de valores medidos (Oliver, 1990).

La validación de las interpolaciones se realizó con las metodologías de campo y cruzada descritas por Henríquez *et al.* (2013). La validación de campo consistió en recopilar análisis de suelos realizados en el año 2014 y compararlos con los datos interpolados mediante el método Kriging. La validación cruzada consistió en extraer 5% de los análisis de suelos colectados para validar las interpolaciones efectuadas en ausencia de estos datos; se realizó una nueva interpolación y consecutivamente se ubicó las coordenadas de los datos ausentes para compararlos con los datos interpolados. Por otro lado, se realizó otro tipo de validación donde a las interpolaciones se les extrajeron los errores calculados para cada observación y se restó al valor original de cada observación con el fin de obtener un mejor ajuste en las interpolaciones; al nuevo valor se le realizó un análisis geoestadístico y se interpoló mediante el método de Kriging

Nutriamento	Modelo	Nugget	Sill	Rango	r^2
pH	Esférico	0.0156	0.3072	2450.0	0.345
Error	Lineal	0.0035	0.0041	23532.6	0.011
Ac	Gaussiano	0.0200	0.4740	2303.6	0.138
Error	Lineal	0.0053	0.0084	23532.6	0.830
Ca	Exponencial	9.5000	76.6200	14610.0	0.729
Error	Lineal	2.9789	4.3567	23532.6	0.283
Mg	Exponencial	0.3000	6.8960	5.760.0	0.576
Error	Lineal	0.0618	0.0618	23532.6	0.115
K	Lineal	0.0133	0.0205	23532.6	0.310
Error	Gaussiano	0.0017	0.0097	1160.5	0.027
P	Esférico	2.5000	5.7300	51100.0	0.751
Error	Lineal	16.6339	22.2999	23532.6	0.363
Zn	Exponencial	2.8100	17.6700	153300.0	0.367
Error	Lineal	2.1720	3.7301	23532.6	0.150
Cu	Lineal	1062.6355	2526.9666	23532.6	0.232
Error	Lineal	700.1462	1609.7401	23532.6	0.162
Fe	Esférico	10.0000	9220.0000	2710.4	0.276
Error	Esférico	0.9100	5.5000	880.0	0.000
Mn	Exponencial	924.0000	3571.0000	153300.0	0.500
Error	Exponencial	654.0000	1996.0000	153300.0	0.358

Cuadro 1. Parámetros geoestadísticos utilizados para el proceso de interpolación y sus respectivos errores para el sector La Palma-Puerto Jiménez, Costa Rica.

Nutriamento	Modelo	Nugget	Sill	Rango	r^2
pH	Esférico	0.0168	0.1356	3390.0	0.393
Error	Lineal	0.0062	0.0062	17427.5	0.430
Ac	Gaussiano	0.0280	0.2580	24751.0	0.688
Error	Gaussiano	0.0303	0.1286	22672.5	0.641
Ca	Esférico	21.2000	53.2100	34140.0	0.473
Error	Lineal	14.7207	14.7207	14727.5	0.381
Mg	Exponencial	7.4100	14.8300	14520.0	0.396
Error	Lineal	4.9107	4.9107	17427.5	0.401
K	Esférico	0.0088	0.0227	41100.0	0.612
Error	Lineal	0.0074	0.0109	17427.5	0.426
P	Exponencial	2.6200	7.3200	14010.0	0.187
Error	Esférico	0.0010	1.1120	1000.0	0.010
Zn	Exponencial	0.5570	1.8960	123300.0	0.334
Error	Lineal	0.4203	0.6920	17427.5	0.314
Cu	Lineal	19.3258	19.3258	17427.5	0.042
Error	Lineal	13.2544	13.2544	17427.5	0.274
Fe	Lineal	4057.1301	5019.7642	17427.5	0.024
Error	Lineal	2710.3492	2710.3492	17427.5	0.020
Mn	Gaussiano	526.0000	1324.0000	23261.4	0.431
Error	Gaussiano	451.0000	903.0000	26448.4	0.333

Cuadro 2. Parámetros geoestadísticos utilizados para el proceso de interpolación y sus respectivos errores para sector Palmar-Chacarita, Costa Rica.

Nutriente	Modelo	Nugget	Sill	Rango	r ²
pH	Gaussiano	0.1175	0.3800	33168.8	0.991
Error	Exponencial	0.1083	0.2886	123300.0	0.722
Ac	Gaussiano	0.0880	0.6560	44008.7	0.971
Error	Gaussiano	0.0950	0.7400	49190.2	0.969
Ca	Esférico	51.5000	130.8000	19670.0	0.965
Error	Lineal	55.8150	55.8150	18934.8	0.525
Mg	Esférico	9.4100	30.9900	12580.0	0.982
Error	Exponencial	2.1000	13.9300	480.0	0.000
K	Exponencial	0.0289	0.1928	2700.0	0.550
Error	Lineal	0.1613	0.1613	18934.8	0.733
P	Exponencial	29.5000	83.5500	123300.0	0.876
Error	Lineal	33.5887	33.5887	18934.8	0.551
Zn	Gaussiano	0.1700	12.3490	32146.9	0.951
Error	Lineal	4.7985	4.7984	19967.6	0.496
Cu	Lineal	20747.0094	2747.0094	18934.8	0.887
Error	Lineal	1957.6913	1957.6913	18934.8	0.928
Fe	Gaussiano	2029.0000	4895.0000	27366.4	0.957
Error	Exponencial	1850.00000	5027.0000	12300.0	0.735
Mn	Gaussiano	125.0000	760.9000	31211.6	0.984
Error	Exponencial	176.0000	562.9000	133650.0	0.831

Cuadro 3. Parámetros geoestadísticos utilizados para el proceso de interpolación y sus respectivos errores para sector de Corredores, Costa Rica.

ordinario y posteriormente se restó empleando la ecuación (2) de McBratney *et al.* (2003). Para las cuatro validaciones se calcularon el promedio real de los datos de validación de campo y del 5% de los datos en validación cruzada, promedio interpolado, promedio absoluto del error (PAE), promedio del cuadrado del error (PCE), estimado de efectividad de predicción (E) y coeficiente de correlación según la metodología descrita por varios autores (Schoeder *et al.*, 2001; Villatoro *et al.*, 2008):

$$(2) \quad \hat{z}(s_o) = \sum \lambda_i z(s_i) - \varepsilon$$

La simbología de la ecuación (2) corresponde a la de la ecuación (1) excepto por el componente que es el error de la estimación interpolado mediante el método de Kriging.

Rangos*	pH	cmol(+).L ⁻¹				mg.L ⁻¹				
	H ₂ O	Ac	Ca	Mg	K	P	Zn	Cu	Fe	Mn
NC	5.5	0.5	4.0	1.0	0.2	10.0	3.0	1.0	10.0	5.0
Mínimo	4.6	0.2	0.56	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	7.0	0.1
Media	5.9	0.4	22.9	7.6	0.6	9.9	2.4	24.2	88.6	23.6
Máximo	8.0	5.9	43.0	25.6	2.5	42.2	23.0	333.0	531.0	238.0
%CV	8.0	122.0	43.0	63.0	75.0	69.0	91.0	201.0	73.0	108.0

Cuadro 4. Rangos de concentración de nutrientes en 574 análisis de suelos recolectados en distintos cultivos de la región Pacífico Sur, Costa Rica.

*Análisis químicos de suelos por Olsen Modificado, recolectados en arroz (n = 134), forestales (n = 89), palma aceitera (n = 310) y varios cultivos (n = 41) en la zona sur de Costa Rica. NC = Nivel crítico (Bertsch *et al.*, 2005). CV = coeficiente de variación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de la condición nutricional de los suelos del Pacífico Sur

Las concentraciones de los nutrientes analizados muestran una elevada variación (Cuadro 4) y los promedios tienden a presentar valores superiores a los niveles críticos (NC) definidos para la mayoría de los cultivos en Costa Rica (Bertsch et al., 2005). Para el Sector Palmar-Chacarita, Cordero y Miner (1975) mencionan niveles críticos de P específicos para arroz (4 mg.L^{-1}) y para maíz (10 mg.L^{-1}). Los coeficientes de variación (CV) encontrados de la acidez intercambiable, Cu y Mn, son superiores al 108% y, por ende, poco confiables, mientras que para las variables pH y Ca los CV son inferiores al 43% (Cuadro 2), todos dentro de los rangos de suficiencia definidos para las regiones según reportan varios autores (Holdridge et al., 1971; Más, 1981; Berstch, 1986; López y Solís, 1992; Pedrosa, 1995; TAHAL, 2000; Flores, 2001; Ramírez, 2008; Méndez y Bertsch, 2012) (Cuadro 4).

El análisis de frecuencias utilizado en las concentraciones de los diferentes nutrientes en el suelo mostraron distribuciones anormales y ten-

dencias entre los percentiles 25 y 75. El pH mostró la mayor distribución de muestras, que ronda entre 5.6 y 6.1, lo que indica una tendencia hacia pH más básicos (Figura 2a). El mayor número de muestras presentó acidez por debajo de $1.0 \text{ cmol}(+).\text{L}^{-1}$; sin embargo, más de 25 muestras alcanzaron rangos superiores siendo estos suelos muy ácidos (Figura 2b). De las bases estudiadas, el Ca presentó valores entre 20 y $40 \text{ cmol}(+).\text{L}^{-1}$ en el mayor número de muestras (Figura 2c), mientras que el Mg mostró la mayor distribución de muestras por debajo de $15 \text{ cmol}(+).\text{L}^{-1}$ (Figura 2d) y el K por debajo de $1.0 \text{ cmol}(+).\text{L}^{-1}$ (Figura 2e). El P presentó el mayor número de muestras inferiores a 20 mg.L^{-1} (Figura 2f). Así mismo, el Zn y Cu mostraron un mayor número de muestras por debajo del nivel crítico, donde el Zn mostró las mayores frecuencias de datos en valores por debajo de 4 mg.L^{-1} (Figura 2g) y el Cu en valores por debajo de 50 mg.L^{-1} (Figura 2h). El Fe mostró las mayores frecuencias entre 44 y 113 mg.L^{-1} (Figura 2i) en los cuartiles, mientras que el Mn presentó en los cuartiles una mayor frecuencia entre 8 a 28 mg.L^{-1} (Figura 2j).

Los rangos de los valores mínimos y máximos de los elementos (Cuadro 5) indican diferencias significativas entre las áreas cubiertas por los diferentes

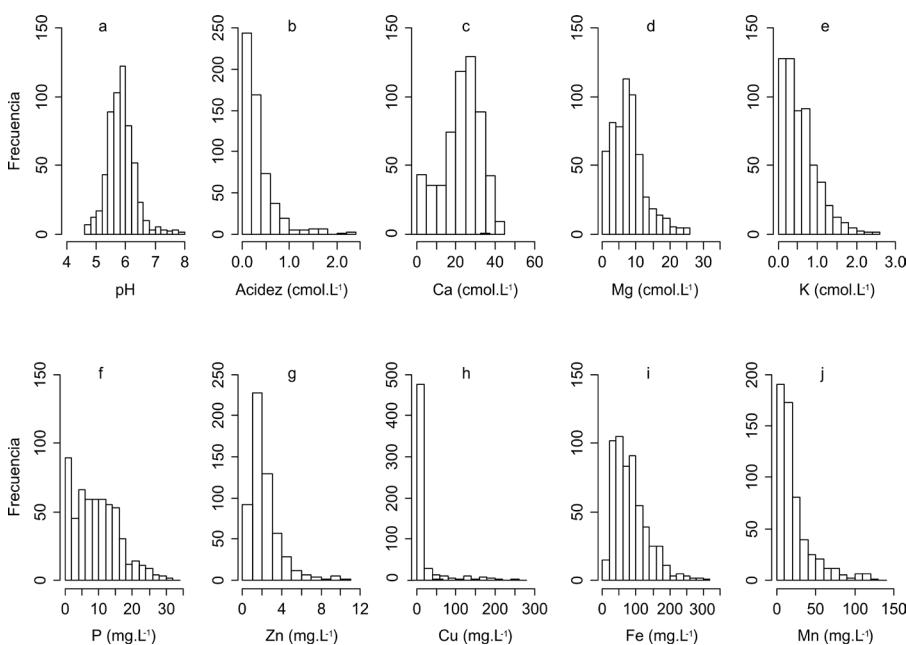


Figura 2. Frecuencia de los contenidos nutricionales en los suelos del Pacífico Sur de Costa Rica (n = 574).

cultivos (palma aceitera, arroz, forestales y cultivos varios) y demuestran que los cultivos se encuentran probablemente en condiciones nutricionales muy bajas o muy altas en los suelos. El valor de pH, la concentración de acidez y bases en la zona Pacífico Sur, mostraron diferencias significativas cuando se compararon entre los distintos cultivos sembrados (Cuadro 5). El pH en el cultivo de arroz y cultivos varios presentó las concentraciones más altas, mientras que el cultivo de especies forestales y palma aceitera presentaron concentraciones similares entre sí; los valores de las variables de acidez vienen aumentando con el tiempo en la zona (Bertsch, 1986; Méndez y Bertsch, 2012) probablemente producto de la adición de fertilizantes con efecto residual ácido en los cultivos y la extracción de cationes en forma de producto cosechado. La acidez fue superior en palma aceitera y forestales ($> 0.46 \text{ cmol (+).L}^{-1}$) lo que presenta una tendencia al NC ($0.5 \text{ cmol (+).L}^{-1}$); no obstante, para arroz y cultivos varios las concentraciones no superaron los 0.32 cmol.L^{-1} . Las bases Ca y Mg presentaron la mayor concentración en los suelos cultivados con arroz, donde las concentraciones para estos elementos fueron superiores a los NC generales considerándose en estados de suficiencia; Ramírez (2008) menciona que algunas enfermedades de la palma aceitera han sido asociadas a la deficiencia de Mg en el valle de Coto. En relación

con los contenidos nutricionales de K los cultivos forestales presentaron la menor concentración del nutrimento en el suelo probablemente debido a que los árboles forestales acidófilos tienen una elevada capacidad de extracción del K en la madera (Alvarado y Raigosa, 2012; Camacho, 2014) y no se encontró diferencia estadística significativa con los niveles de K en arroz, mientras que el cultivo de palma aceitera mostró la mayor concentración del nutrimento, el cual puede acumularse debido a su adición en grandes cantidades en este cultivo (Ramírez, 2008). La concentración de K en los distintos suelos fue igual o superior al NC ($0.2 \text{ cmol (+).L}^{-1}$).

Los contenidos nutricionales de los suelos del Pacífico Sur son muy variables, posiblemente por los distintos órdenes de suelos y manejo de la fertilización en los cultivos que se encuentran en la región. La presencia de Inceptisoles brindaría una variabilidad en el sistema, debido a que son influenciados por los desbordamientos de ríos, los cuales en la zona de estudio traen usualmente altos contenidos de bases transportadas desde la colindante cordillera costanera de origen calizo. Los Ultisoles se encuentran en las partes más elevadas, cercanas al océano Pacífico, y son afectados por la lixiviación, producto de las intensas y constantes precipitaciones que existen en la zona (IMN, 2008). Por otro lado, los manejos efectuados en cada cultivo modificarían

Cultivos	pH	Ac	Ca	Mg	K
----- cmol(+).L ⁻¹ -----					
NC	5.5	0.5	4.0	1.0	0.2
Arroz	6.0 a*	0.3 b	26.8 a	10.6 a	0.3 bc
Forestales	5.8 b	0.5 a	20.0 c	5.6 b	0.2 c
Palma aceitera	5.8 b	0.5 a	22.5 b	7.4 c	0.8 a
Cultivos varios	5.9 ab	0.3 b	18.9 c	3.4 d	0.4 b
P-Value Shapiro-Wilk*x	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
P-value Kruskal-Wallis	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

Cuadro 5. Concentración de acidez, pH y bases en distintos cultivos de la región Pacífico Sur de Costa Rica.

Medias seguidas por una misma letra no representan diferencia estadística según prueba de Kruskal Wallis Chi-Squared, $\alpha = 0,05$ p.adj = Bonferroni, R versión 0.98.501. NC = Nivel crítico (Bertsch et al., 2005). * Prueba hipótesis de Shapiro-Wilk para determinación de normalidad de los datos. Medias seguidas por una misma letra no representan diferencia estadística según prueba de Kruskal Wallis Chi-Squared, $\alpha = 0,05$ p.adj = Bonferroni, R versión 0.98.501. NC = Nivel crítico (Bertsch et al., 2005). * Prueba hipótesis de Shapiro-Wilk para determinación de normalidad de los datos.

significativamente la concentración de nutrientes en los suelos utilizados. Por ejemplo, los suelos utilizados en palma aceitera requieren mayor contenido de K y Mg por los desbalances encontrados con los contenidos de Ca, mientras que en suelos arroceros la aplicación de estos nutrientes es menor debido a que las aplicaciones van dirigidas a una mayor cantidad de N al cultivo (Owen, 1992; Fairhurst, 2003; Villarreal et al., 2007; Quintero et al., 2011). Además, en suelos utilizados para forestales y cultivos varios en muchas de las ocasiones las aplicaciones de nutrientes son nulas.

En relación con las diferencias en disponibilidad de nutrientes de plantaciones forestales, no estimada en este estudio, debe mencionarse que Granados (2014) encontró variaciones en el incremento en altura de los árboles de *Tectona grandis* y de *Gmelina arborea* entre los sectores del presente trabajo, empleando métodos geoestadísticos; así, los mayores rendimientos se ubican para *G. Arborea*, que se encuentran en el sector Diquís-Sierpe (20-36 m³ ha⁻¹ año⁻¹) con posibilidades de crecimiento para la especie similares en Corredores y Puerto Jiménez (12-20 m³ ha⁻¹ año⁻¹), probablemente relacionados con diferencias edáficas.

Las concentraciones de P y micronutrientos tuvieron diferencias estadísticamente significativas entre los tres cultivos y la categoría de cultivos varios (Cuadro 6). Las concentraciones de P fueron ma-

yores en los suelos de palma aceitera, siendo estos superiores al NC, según Ramírez (2008), debido a la elevada adición de fósforo producto de la aplicación de fertilizante al cultivo. Sin embargo, el P en los cultivos de arroz y cultivos varios mostraron concentraciones inferiores al NC siendo el cultivo de forestales el que presentó el menor contenido (3.8 cmol(+).L⁻¹) del nutriente. Las concentraciones de Zn son bajas en los distintos cultivos con valores menores al NC, hecho mencionado con anterioridad por Flores (2001); además la palma aceitera y cultivos varios fueron los que presentaron el mayor contenido de este nutriente en comparación al contenido en arroz y forestales. Flores et al. (1979) no encontraron variaciones importantes en la disponibilidad del elemento entre suelos cultivados y no cultivados en la misma zona en concentraciones que variaron entre 12 y 65 mg L⁻¹. Por otro lado, las concentraciones de Cu presentaron valores superiores al NC pero no tóxicos para todos los cultivos de la zona. La palma aceitera exhibió la mayor concentración de Cu en los suelos del Pacífico Sur, mientras que el cultivo de arroz presentó el menor contenido difiriendo significativamente de los demás cultivos; este hecho es contrario a lo que encontraron Flores et al. (1979), ya que los autores mencionan los valores más altos (promedio 103 mg.L⁻¹) en suelos cultivados con banano y los más bajos (promedio 21 mg.L⁻¹) en suelos plantados con palma de aceite. El

Cuadro 6. Concentración promedio de fósforo y micro nutrientos en suelos de la región Pacífico Sur de Costa Rica.

Cultivos	P	Zn	Cu	Fe	Mn
----- mg.L-1 -----					
NC	10.0	3.0	1.0	10.0	5.0
Arroz	7.1 b	1.6 b	13.4 a	73.1 bc	34.2 a
Forestales	3.8 c	2.4 b	16.6 c	81.1 b	27.7 bc
Palma aceitera	13.1 a	2.8 a	31.6 b	99.8 a	16.9 c
Cultivos varios	8.6 b	2.3 ab	19.6 c	70.0 c	30.9 b
P-Value Shapiro-Wilk*	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
P-value Kruskal-Wallis	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

Medias seguidas por una misma letra no representan diferencia estadística según prueba de Kruskal Wallis Chi-Squared, $\alpha = 0.05$ p.adj = Bonferroni, R versión 0.98.501. NC = Nivel crítico (Bertsch et al., 2005). * Prueba hipótesis de Shapiro-Wilk para determinación de normalidad de los datos.

cultivo de palma aceitera mostró la mayor concentración de Fe, mientras que en cultivos varios este nutriente presentó los menores contenidos. Por último, el Mn mostró rangos superiores al NC para todos los cultivos. Al compararse todos los cultivos en estudio, la palma aceitera exhibió la menor concentración de Mn y el cultivo de arroz presentó la mayor concentración del nutriente (Cuadro 6).

Los órdenes de suelos también pueden influir en la variabilidad de P, por ejemplo: la alta sorción específica que sufre el P en los materiales amorfos (alófanas), mineral secundario abundante en los Andisoles, que se encuentran en las zonas cercanas a la frontera con Panamá (Alvarado *et al.*, 2001). La variación de Zn y Cu se podría explicar por las fertilizaciones reforzadas para aumentar la absorción del Zn en los suelos con altos contenidos de bases y P, lo que provocaría problemas de antagonismo y su solubilidad con los distintos niveles de pH (Owen, 1992; Fairhurst, 2003). Las variaciones de Cu son posible producto de aplicación excesiva de caldo bordelés que se utilizaba en el control de la enfermedad conocida “Sigatoka negra” (*Mycosphaerela fijiensis*) en el cultivo de banano (Cordero y Ramírez, 1979; Granados y Bornemisza, 1991). Por último, las variaciones de Fe y Mn son influenciadas mayoritariamente en los suelos aluviales que se encuentran cercanos a los principales ríos que inundan las partes bajas

del Pacífico Sur. Las variaciones son producto de un activo proceso de reducción-oxidación y por la variación de pH en algunas partes altas que muchas veces no son tomados en cuenta en los manejos de fertilización (Molina 1998, Sposito 2008).

En síntesis, la concentración de nutrientes en el suelo varía según los principales cultivos del Pacífico Sur y según los tipos de suelos; presentaron límites permisibles en los niveles críticos para la mayoría de los nutrientes evaluados según varios autores (Cordero y Miner, 1975, López y Solís, 1992; Pedrosa, 1995; Flores, 2001; Ramírez, 2008; Granados, 2014). Las diferencias estadísticamente significativas se deben probablemente a la distribución de los cultivos en los distintos órdenes de suelo y al manejo agronómico y nutricional que se brinda a cada cultivo. Es importante destacar que el arroz se cultiva en las zonas con mayor contenido de humedad en el suelo, ya que las variedades que se siembran es bajo el sistema de “secano”, razón por la cual los agricultores buscan partes bajas de la región donde el río pueda inundar y conservar el contenido de agua en el suelo por más tiempo, lo que provoca un aumento en las concentraciones de bases, principalmente Ca y Mg, que son arrastrados y depositados con los sedimentos (Porta *et al.*, 2003). En las plantaciones forestales ocurre lo contrario, ya que se plantan en los pies de monte cercanos a las montañas (Granados 2014), donde

Cuadro 7. Correlaciones del pH, acidez intercambiable y nutrientes en suelos de la región Pacífico Sur de Costa Rica.

	pH	Ac	Ca	Mg	K	P	Zn	Cu	Fe	Mn
pH		-0.69	0.46	0.31	0.19	0.18	-0.29	0.01	-0.43	-0.37
Ac	***+		-0.32	-0.17	-0.02	-0.04	0.19	0.04	0.36	0.16
Ca	***	***		0.55	0.49	0.35	0.08	0.13	-0.35	0.11
Mg	***	***	***		0.43	0.19	0.01	0.27	-0.32	0.05
K	***	ns	***	***		0.66	0.29	0.14	0.02	-0.35
P	***	ns	***	***	***		0.37	0.30	0.25	-0.21
Zn	***	**	*	*	***	***		0.15	0.30	0.20
Cu	ns	ns	**	***	**	***	***		0.08	0.06
Fe	***	***	***	***	ns	***	***	ns		0.22
Mn	***	***	*	ns	***	***	***	ns	***	

*** p < 0001, ** p < 001 * p < 005 según correlación de Spearman. ns = no significativo. Ac = acidez intercambiable.

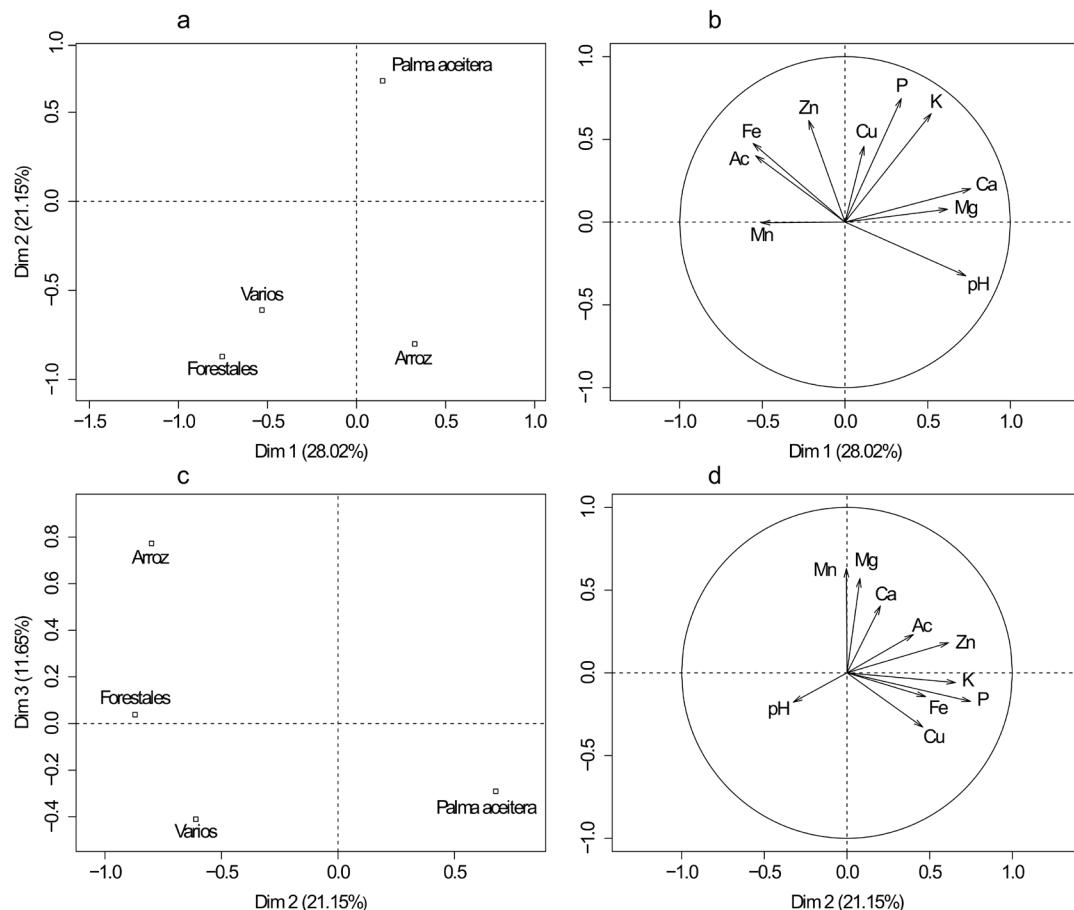


Figura 3. Análisis de componentes principales para el contenido nutricional en los suelos de Pacífico Sur de Costa Rica: a) mapa de factor de individuos en dimensiones 1 y 2; b) mapa de factor de variables en dimensiones 1 y 2; c) mapa de factor de individuos en dimensión 2 y 3; d) mapa de factor de variables en dimensiones 2 y 3.

los suelos son principalmente rojos y muchas veces resultan erosionados por la actividad agrícola.

Variabilidad de nutrientes en suelos del Pacífico Sur

El análisis multivariado mostró correlaciones entre los distintos nutrientes según la prueba de Spearman; se encontró una correlación positiva entre las bases Ca, Mg y K (Cuadro 7) con coeficientes de correlación ($Coe > 0.43$, valor $p < 0.001$), una correlación inversamente proporcional entre pH y Acidez Intercambiable ($Coe -0.69$, valor $p < 0.001$) y altos coeficientes de correlación entre K y P ($Coe 0.66$ valor $p < 0.001$) y entre el pH y Ca ($Coe 0.46$, valor $p < 0.001$). Se observaron

correlaciones adicionales entre distintos elementos con coeficientes que varían desde -0.43 hasta 0.37 (Cuadro 7).

Con el fin de encontrar una posible estructura en la variabilidad de la base de datos, se realizó un análisis de componentes principales (CP). Dicho análisis mostró que las primeras tres dimensiones explican un 60.8% de la varianza de los nutrientes del suelo en la región Pacífico Sur (Figura 3). La primera dimensión explica 28.0% de la variación del sistema, la segunda 21.1% y la tercera 11.7%. El análisis de CP separa los distintos cultivos, excepto forestales y cultivos varios que ocurren en coordenadas similares al comparar los CP1 y CP2, mientras que el de CP2 y CP3 presenta una

separación similar, a excepción de forestales y arroz (Figura 3a-2c). Al parecer para el CP1 y el CP2, el P y el K extraíbles están mayormente correlacionados con el cultivo de palma aceitera e inversamente correlacionados con forestales y cultivos varios (Figura 3a-b). El pH parece estar correlacionado con el cultivo de arroz mientras que el Zn presentó una correlación inversa con este componente de cultivos varios. Al observar el mapa de factor de las variables incluidas en el análisis (Figura 3), los siguientes pares de elementos están altamente correlacionados: Ac con Fe, P con K, Ca con Mg (Figura 3b). Así mismo, el análisis de CP2 y CP3 mostró una correlación de Fe y Cu para el cultivo de palma aceitera (Figura 3c-d). El pH presentó una correlación con cultivos varios y una correlación inversa con Ca y Ac. Por último, en el mapa de factor de variables, los pares de nutrientes Ac con Zn, Fe con Cu, P con K y Ca con Mg están altamente relacionados (Figura 3d).

La variabilidad de los suelos en la región Pacífico Sur es muy alta; los análisis de CP mostraron una explicación aproximadamente de 60.8% en la suma de las tres primeras dimensiones para el contenido nutricional. Esto demuestra que las características de los sitios (suelo-relieve-cultivo) son ampliamente variables en esta zona, y que su comportamiento nutricional puede estar condicionado con el manejo de cada cultivo, o los cultivos que fueron sembrados anteriormente. El mapa de factores de variables en los CP1 y CP2 mostró que los suelos forestales y cultivos varios presentaron altas correlaciones; estos cultivos se encuentren en suelos con similares contenidos nutricionales. También en estos CP mostraron suelos con características muy distintas, entre estas la correlación inversa de los cultivos varios y palma aceitera, donde los cultivos varios son prácticamente sembrados en suelos ondulados de pendientes por encima del 20%, mientras que la palma aceitera es sembrada en su mayoría en zonas aluviales, ligeramente planas (< 10 %). Por otro lado, los CP2 y CP3 dieron respuesta a correlaciones muy débiles con el cultivo de arroz y forestales, quizás algunas zonas arroceras estén cercanas a zonas forestales o bien fueron sustituidas en el tiempo, lo que explicaría esta variación.

Las correlaciones entre los nutrientes podrían explicar la variación del sistema al interpretar sus arreglos dimensionales con los distintos cultivos. En las correlaciones de Spearman el pH y la acidez presentaron un comportamiento inverso en sus concentraciones en el Pacífico Sur, esto es un comportamiento normal y esperable en el suelo, debido a que conforme aumenta la acidez disminuye el pH (Bertsch, 1998; Molina, 1998; Sposito, 2008). Del mismo modo se debe esperar que el pH también presente una alta correlación con las concentraciones de Ca, debido a que el Ca impide la formación de iones hidronios (H^+) en las arcillas presentes (Sposito, 2008). Las dimensiones calculadas en el análisis de CP también corroboran el tipo de correlación mencionado anteriormente; sin embargo, el mapa de factores de variables además correlacionó los comportamientos del pH con las características de los suelos bajo cultivo de arroz y cultivos varios.

Los valores de disponibilidad de Ca, Mg y K correlacionaron entre sí, pero al analizar los CPs, el Ca y Mg, a diferencia del K, mostraron pocas tendencias a tener una relación dimensional en áreas plantadas con palma aceitera. Es muy probable que el CP2 en el mapa de factores de variables explique la variabilidad de Ca y Mg, debido a que estos nutrientes siguen la tendencia hacia el eje x, posiblemente por la influencia que existe en la variabilidad y afinidad de los suelos cultivados de arroz. Por su posición fisiográfica, es probable que los suelos sembrados con palma y arroz sean muy semejantes en sus minerales secundarios (Ortiz y Collins, 1992) y hacen que los nutrientes en especial Ca y Mg presenten comportamientos similares (Bertsch, 1998; Ross *et al.*, 2007; Mata *et al.*, 2013).

La correlación K y P encontrada en terrenos plantados con palma aceitera puede explicarse por la variabilidad de los suelos en estas plantaciones. Es posible que las concentraciones de potasio sean altas en los suelos de palma aceitera debido a las aplicaciones de fertilizantes (Fairhurst, 2003; Ramírez, 2008). Además, muchos de los suelos de palma aceitera fueron activos en la producción de banano en la zona a partir de 1930 (Royo, 2003; Villalobos, 2006) donde la adición de K es mucho

más alta en comparación a otros cultivos, siendo catalogado el segundo nutriente de mayor importancia en banano (Meléndez y Molina, 2001). Actualmente a la palma aceitera también se le suministran altas dosis de K aunque su requerimiento nutricional no es similar a banano; esto es realizado para balancear su nutrición con las concentraciones de Ca y contrarrestar su antagonismo (Owen, 1992; Fairhurst, 2003; Donough, 2008). Para el caso del P se podría explicar en los suelos plantados con palma aceitera en los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) presentes en la zona, principalmente los que se encuentran cercanos a la frontera con Panamá.

Los micronutrientos Zn, Fe y Cu presentaron altas correlaciones entre sí. Los CP1 y CP2 explicaron la variación de Zn y la correlación de Fe con la acidez del suelo, mientras que el CP2 y CP3 explican que los nutrientes Fe y Cu correlacionen en los suelos con el cultivo de palma aceitera. La variabilidad que presentó el Zn fue anteriormente explicada por Flores *et al.* (1979) quienes informan sobre valores de Cu y Zn más altos en el valle del Diquís, un decrecimiento de ambos elementos en el sub suelo y ninguna relación entre ellos, pero muy vinculada con el material calcáreo del que se originan estos suelos. En relación con el Fe existe correlación con la acidez y es debido a la solubilidad de óxidos de Fe y Al que presenta cuando la acidez aumenta (Molina, 1998; Alvarado, 2001; Rivera *et al.*, 2003) y su influencia redox cuando existe una dinámica en la tabla de agua en el perfil de los suelos.

Variación temporal, espacial y validación de concentraciones de nutrientes en los suelos del Pacífico Sur

Se encontró una mejor distribución ajustada en la interpolación cuando se validaron los parámetros nutricionales mediante validación cruzada en comparación con la validación de campo (Cuadro 8). Los promedios interpolados mostraron un mejor ajuste al presentar una mayor aproximación de cada concentración de nutriente, cuando se utilizó la validación cruzada con 5% de los análisis químicos del Pacífico Sur en comparación con la validación de campo efectuada en el 2014. Así mismo, el promedio absoluto del error

(PAE) y el promedio del cuadrado del error (PCE) mostraron una mayor aproximación a 0 cuando se utilizó la validación cruzada y obtuvo un mejor estimado de predicción (E) para todos los nutrientes. Al calcular el error para cada interpolación, los parámetros estadísticos (PAE, PCE, E y coeficiente de correlación) mejoraron para la validación de campo y la validación cruzada, demostrando que al restar los errores interpolados a los datos reales interpolados mejoran el ajuste de la interpolación en todos los nutrientes del sistema. Al comparar la validación de campo y la validación cruzada con la resta de los errores interpolados se encontró una mejora en los parámetros estadísticos cuando se utilizó la validación cruzada del Kriging menos los errores de interpolación. Por último, se encontró que la predicción de la concentración de los nutrientes es mejor para los macronutrientos que para los micronutrientos, en función de la variación que se encuentra a niveles de análisis de laboratorio para los micronutrientos (Corrales *et al.*, 2005), lo que efectúa una correspondencia precisa con el meta-análisis.

Las concentraciones de nutrientes en los suelos del Pacífico Sur muestran un mejor ajuste según la delimitación de zonas activamente agrícolas. La delimitación de sectores de influencia agrícola brinda una mejor predicción a las concentraciones interpoladas, debido a que el método de Kriging ajusta a efectuar las predicciones en zonas agrícola-mente activas y no en zonas de pocas influencias, es decir en las áreas protegidas y zonas no cultivadas. Por otro lado, es muy probable que la predicción de la concentración de los nutrientes en la zona presente una mejor predicción en los sectores de mayor cantidad de observaciones, similar al sector Corredores de este estudio, originando que la predicción para el mapa de esta zona es más precisa que los sectores Palmar–Chacarita y mucho más precisa que el sector Palma–Puerto Jiménez. En la validación de las predicciones de los nutrientes con los distintos métodos se encontró claramente el efecto de la variación espacial y temporal de las observaciones. La validación de campo fue menos precisa en la predicción, debido a que las observaciones de los análisis químicos

Cuadro 8. Parámetros estadísticos para la validación cruzada y campo de Kriging en concentraciones de nutrientes en la región Pacífico Sur, Costa Rica.

Validación de campo de Kriging										
	pH	Acidez	Ca	Mg	K	P	Cu	Fe	Zn	Mn
	5.6	0.5	20.8	7.4	1.0	5.2	45.3	236.4	10.9	41.5
interpolado	5.9	0.4	23.6	8.3	0.7	11.9	29.2	88.2	2.4	20.1
PAE	-0.2	0.1	-2.8	-0.9	0.3	-6.8	16.1	148.2	8.5	21.4
PCE	0.3	0.1	51.7	12.9	0.4	60.9	5441.4	39318.6	262.8	3209.9
E	-29.9	7.1	4.8	-38.3	0.8	-390.8	30.5	-109.3	-35.4	12.3
Coef. Correlación	0.1	0.4	0.4	0.2	0.4	0.2	0.6	0.4	0.2	0.8
Validación cruzada de Kriging										
real	6.0	0.4	28.6	9.4	0.7	12.0	25.0	78.5	3.1	25.4
interpolado	5.9	0.4	26.5	9.2	0.7	12.3	31.1	87.2	2.7	18.7
PAE	0.1	0.0	1.4	0.1	0.0	-0.2	-3.4	-4.9	0.2	3.8
PCE	0.1	0.1	25.5	6.9	0.1	9.4	431.8	634.4	5.9	121.1
E	42.8	29.0	7.6	37.9	1.1	42.3	58.5	57.1	35.1	48.2
Coef. Correlación	0.7	0.9	0.4	0.6	0.4	0.7	0.8	0.8	0.7	0.9
Validación campo de Kriging menos los errores de interpolación										
real	5.6	0.5	20.8	7.4	1.0	5.2	45.3	236.4	10.9	41.5
interpolado	5.8	0.4	23.3	8.0	0.7	12.0	29.6	90.6	2.4	21.1
PAE	-0.2	0.1	-2.5	-0.6	0.3	-6.8	15.7	145.8	8.5	20.4
PCE	0.3	0.1	52.2	14.6	0.4	65.4	5478.1	39127.8	261.6	2894.4
E	-31.1	7.2	3.9	-57.1	0.8	-426.6	30.0	-108.2	-34.8	20.9
Coef. Correlación	0.1	0.4	0.4	0.1	0.4	0.1	0.6	0.2	0.3	0.8
Validación cruzada de Kriging menos los errores de interpolación										
real	6.0	0.4	28.6	9.4	0.7	12.0	25.0	78.5	3.1	25.4
interpolado	5.9	0.4	26.5	9.3	0.7	12.4	33.8	85.0	2.7	19.0
PAE	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	-0.2	-5.0	-3.7	0.2	3.6
PCE	0.1	0.1	25.2	7.2	0.1	10.1	484.7	690.8	6.0	102.5
E	48.2	60.9	8.8	35.4	1.2	37.9	53.5	53.2	34.7	56.2
Coef. Correlación	0.7	0.8	0.4	0.6	0.5	0.6	0.8	0.8	0.7	0.9

se realizaron entre los años 2001-2013 mientras que los datos de validación de campo del presente estudio corresponden a análisis del año 2014, mostrando una variación temporal importante. La variación temporal de la disponibilidad de nutrientes en años anteriores se ha visto alterada por la aplicación de fertilizantes y por la absorción de los nutrientes por los cultivos, variando la con-

centración actual del área de validación. Investigaciones demuestran que la variación temporal es modificada activamente en el tiempo, donde el efecto antrópico y de la naturaleza modifican los sitios continuamente, siendo un proceso normal y específico para cada entorno (Silveira *et al.*, 1999; Martínez y Martín, 2003; Dec *et al.*, 2011). La validación cruzada mostró un mejor ajuste en las

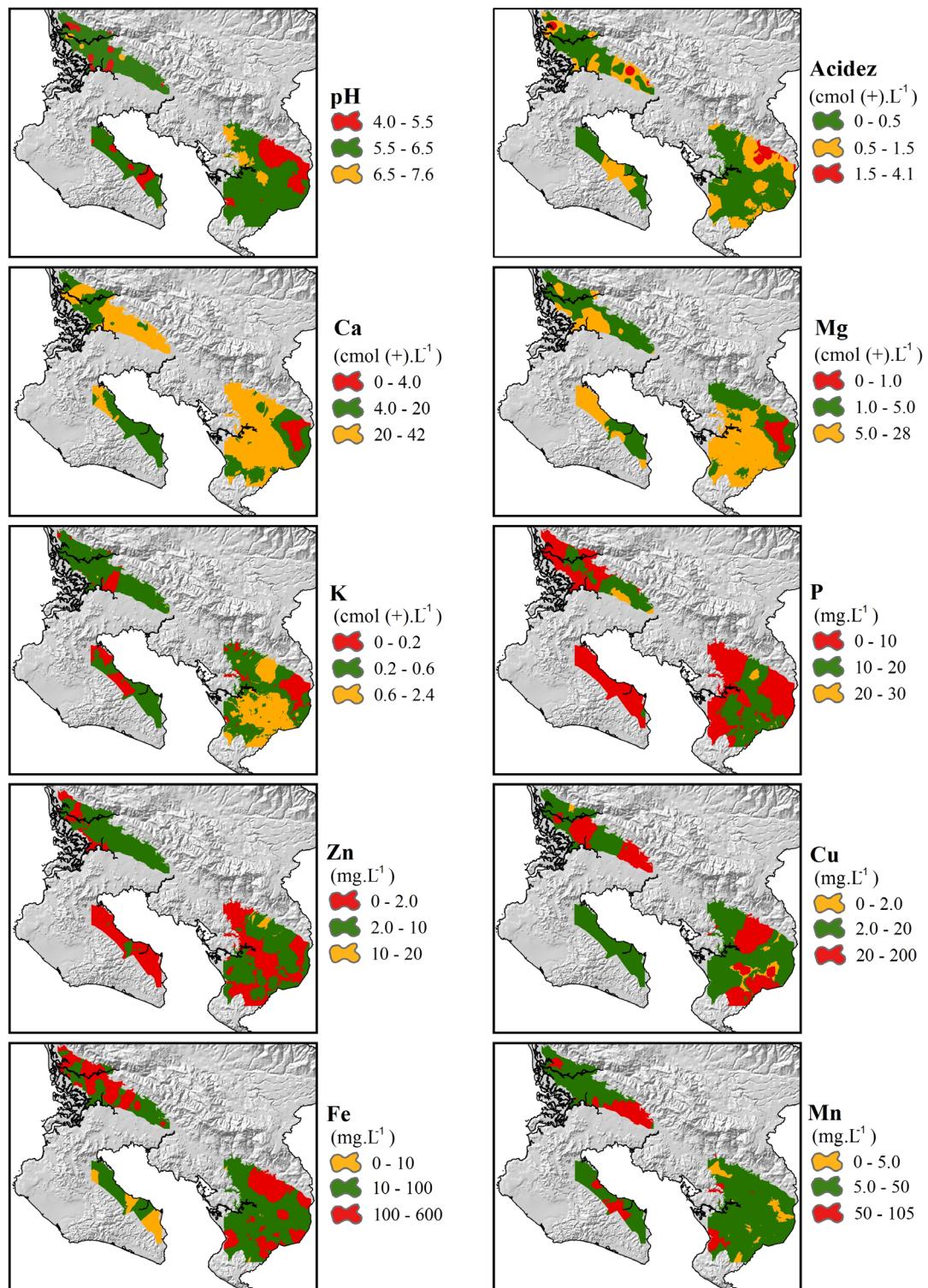


Figura 4. Variación espacial de los nutrientes en los suelos de la región Pacífico Sur de Costa Rica.

predicciones, debido a la concentración de nutrientes la cual fue similar a las observaciones que se utilizaron para la interpolación sin incurrir a un análisis nuevo. Para este caso las predicciones muestran en menor medida una variación temporal y es muy probable que se encuentren altamente influenciadas por una variación espacial demostrada en el meta-análisis de las observaciones. Efectos similares se encontraron en estudios geoestadísticos en la concentración de materia orgánica, pH, Ca, K, CIC, P, NH₄ y micronutrientos en la alta variabilidad temporal que mostraban los sistemas agrícolas y pecuarios (Ovales y Rey, 1994; Ponce *et al.*, 1999; Valbuena *et al.*, 2008; Monteverde y Del Pino, 2014, Prieto *et al.*, 2014), demostrando que es la interpolación más aceptable para la concentración de los nutrientes de la zona Pacífico Sur (Figura 4)

CONCLUSIONES

El meta-análisis reveló que la concentración de nutrientes mostró un comportamiento enlazado al manejo agronómico y la génesis de suelos entre los cultivos de palma aceitera, arroz, forestales y “cultivos varios” de mayor importancia en la parte baja del Pacífico Sur de Costa Rica. Las relaciones encontradas para la acidez, pH, Mg y K manifestaron tendencias altamente correlacionadas con la fertilización de los cultivos. Las concentraciones de Ca estuvieron muy ligadas a la génesis de los suelos debido al arrastre y deposición de los abanicos aluviales cercanos a los ríos de mayor importancia en la zona, similar para el caso de los micronutrientos a excepción de Cu, el cual presentó altas concentraciones en los suelos producto de las aplicaciones de fungicidas en la actividad bananera.

El análisis de componentes principales predijo en sus primeras tres dimensiones 60.8% de la variabilidad de los datos, lo que respalda el comportamiento en relación con el cultivo y probablemente enfatiza el manejo del mismo. Así mismo para poder observar de una manera gráfica y aceptable el comportamiento espacial en la concentración de nutrientes en la zona, la validación cruzada

de interpolación mediante Kriging, restando los errores de interpolación, estableció el mejor ajuste de interpolación de la variabilidad espacial de la fertilidad de los suelos del Pacífico Sur. Esta herramienta de análisis tiene la principal virtud de representar espacialmente la variabilidad intrínseca que existe en unidades de paisaje similares; sin embargo, se requiere de una cantidad de datos densa para obtener buenos resultados.

La información generada es un insumo útil para la toma de decisiones de índole agronómico en la zona, que además puede complementar las recomendaciones técnicas que buscan mejorar la productividad de los cultivos. Este aporte toma en consideración las características del sitio y la situación de las áreas en estudio

BIBLIOGRAFÍA

- Abdi, H. y L. Williams (2010), “Principal component analysis”, *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 2, núm. 4, pp. 433-459.
- Alvarado, A. (1985), *El origen de los suelos*, CATIE, Turrrialba, Costa Rica, 54 pp.
- Alvarado, A. y J. Raigosa (eds.; 2012), *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica, 411 p.
- Alvarado, A., R. Mata y M. Chinchilla (2014), “Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el periodo 1931-2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vírticas y oxídico-caoloníticas”, *Agronomía Costarricense*, vol. 38, núm. 1, pp. 107-131.
- Alvarado, A., F. Bertsch, E. Bornemisza, G. Cabalceta, W. Forsythe, C. Henríquez, R. Mata, E. Molina y R. Salas (2001), *Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica*, primera ed., Asociación Costarricense de la Ciencia de Suelo, San José, Costa Rica, 112 pp.
- Álvarez, R. (1994), *Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS: aplicación a las ciencias de la salud*, Díaz de Santos, Madrid, 408 pp.
- Barquiero, J. y R. Sáenz (1987), *Aparatos volcánicos de Costa Rica*, Heredia, Costa Rica.
- Bergoeing, J. P. (1978), “Geomorfología litoral de Puerto Jiménez, Península de Osa, Costa Rica”, *Revista Semestral Instituto Geográfico Nacional*, pp. 23-28.
- Bertsch, F. (1986), *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica*, EUCR, San José, Costa Rica, 78 pp.

- Bertsch, F. (1998), *La fertilidad de los suelos y su manejo*, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica, 157 pp.
- Bertsch, F., J. Bejarano y M. Corrales (2005), “Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica”, *Agronomía Costarricense*, vol. 29, núm. 3, pp. 137-142.
- Bonet, A. (2014), *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos de aplicación*, Editorial Dykinson S.L. Madrid, España, 850 pp.
- Botella, J. y G. Gambara (2002), *Qué es el meta-análisis*, Biblioteca Nueva, Madrid.
- Buol, S. (2003), *Soil genesis and classification*, quinta ed., Iowa State Press, Ames, Iowa, 494 pp.
- Burrough, P. (1985), *Principles of geographical information systems for land resource assessment*, Clarendon Press, Oxford, Inglaterra, 193 pp.
- Camacho, M. (2014), Modelo de absorción de nutrientes como herramienta para hacer recomendaciones de manejo en plantaciones de *Vochysia guatemalensis* Donn. Smith en el trópico muy húmedo de Costa Rica, Proyecto de Graduación Licenciado en Ingeniería Agronómica con énfasis en Fitotecnia Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, San José (Costa Rica). 103 pp.
- Conesa, C. y J. Bautista (2004), *Territorio y medio ambiente: métodos cuantitativos y técnicas de información geográficas*, Universidad de Murcia, Editum, Murcia, España, 404p p.
- Cordero, A. y G. Miner (1975), “Programa de calibración de análisis de suelos para la fertilización de arroz y maíz en Costa Rica”, en: Bornemisza, E y Alvarado A. (eds.), *Manejo de Suelos en América Tropical*, pp. 533-551.
- Cordero, A. y G. Ramírez (1979), “Acumulamiento de cobre en los suelos del Pacífico Sur de Costa Rica y sus efectos detrimetiales en la agricultura”, *Agronomía Costarricense*, vol. 3, núm. 1, pp. 63-78.
- Córdoba, M., M. Balzarini, C. Bruno y J. Costa (2012), “Análisis de componentes principales con datos georeferenciados: una aplicación para la agricultura de precisión”, *Revista FCA UNCUYO*, vol. 44, núm. 1, pp. 27-39.
- Corrales, M., F. Bertsch y J. A. Bejarano (2005), “Los laboratorios de análisis de suelos y foliares en Costa Rica: informe del comité de laboratorios de análisis de suelos, plantas y aguas”, *Agronomía Costarricense*, vol. 29, núm. 3, pp. 125-135.
- Dec, D., Dorner J. y O. Balocchi (2011), “Temporal and spatial variability of structure dependent properties of a volcanic ash soil under pasture in southern Chile”, *Chilean Journal of Agricultural Research*, vol. 71, núm. 1, pp. 293-303.
- Donough, C. (2008), “Manejo de la nutrición y fertilización de la palma aceitera”, *International Plant Nutrition Institute*, vol. 1, núm. 9, pp. 1-14.
- Fairhurst, T. (2003), *Oil palm: management for large and sustainable yields*, Potash & Phosphate Inst, Singapore, 384 pp.
- Flores, C. L. (2001), “Manejo de suelos y fertilización del cultivo del banano”, en: G. Meléndez y E. Molina (eds.), *Fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos en Costa Rica*, CIA/UCR, Memorias, pp. 136-144.
- Flores, R. A., E. Bornemisza y A. Alvarado (1979), “Influencia de las propiedades de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica sobre su contenido de cationes menores. II. Cobre y zinc extraíbles”, *Turrialba*, vol. 29, núm. 2, pp. 105-119.
- Gómez, O. y M. Chinchilla (2005), Estudio taxonómico y mineralógico de los suelos de la cuenca del río Téraba a escala 1:50.000, provincias de Puntarenas y San José, MAG/ICE, San José, Costa Rica, 226 pp.
- Gonzalo, L., G. Augusto y J. Fernanzo (2008), “Introducción a Kernel ACP y otros métodos espectrales aplicados al aprendizaje no supervisado”, *Revista Colombiana Estadística* vol. 31, núm. 1, pp. 19-40.
- Granados, M de los A. (2014), Crecimiento de la teca, (*Tectona grandis* Linn.f.) en plantaciones forestales y linderos maderables de la zona sur, Costa Rica, Tesis de Lic. Ing. Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica, 109 pp.
- Granados, L. y E. Bornemisza (1991), “Cambios en los contenidos de las fracciones de cobre en un Udand, en respuesta a la aplicación del elemento”, *Agronomía Costarricense* vol. 15, núms. 1, 2, pp. 45-49.
- Guisye, C. (2006), *Tratamiento de datos*, Díaz de Santos, Madrid, España, 356 pp.
- Henríquez, C., J. C. Méndez y R. Masis (2013), “Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante análisis Kriging y su validación”, *Agronomía Costarricense*, vol. 37, núm. 2, pp. 71-82.
- Holdridge, L. R., W. C. Grenke, W. H. Hatheway, T. Liang, J. A. Tosi (1971), *Forest environments in tropical life zones: a pilot study*, Pergamon Press, New York, 747 pp.
- Huedo, T. y B. Johnston (2010), *Modelos estadísticos en Meta-análisis*, Gardners Books, La Coruña, España, 74 pp.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional) (2008), *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*, Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica, 75 pp.
- Janzen, D. H. (1991), *Historia Natural de Costa Rica*, The University of Chicago Press, Illinois. Tr. al español por M. Chavarría y L. D. Gómez, Edit. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 822 pp.

- Jaramillo, D., M. Anaya, C. Restrepo, H. González y F. Álvarez (2011), "Variables físicas que explican la variabilidad de suelo aluvial y su comportamiento espacial", *Revista Agropecuaria Brasileira*, vol. 46, núm. 12, pp. 1707-1715.
- Jolliffe, I. (2005), "Principal Component Analysis", en Everitt, B. S. y Howell, D.C. (eds.), *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 488 pp.
- Kass, D. (1996), *Fertilidad de suelos*, EUNED, San José, Costa Rica, 272 pp.
- Letón, E. y A. Pedromino (2001), *Introducción al análisis de datos en meta-análisis*, Díaz de Santos, Madrid, España, 136 pp.
- López, A. y P. Solís (1992), "Contenidos e interacciones de los nutrientes en tres zonas bananeras de Costa Rica", *CORBANA*, vol. 15, núm. 36, pp. 25-32.
- López, R. (1978), *Caracterización de la fracción mineral en cinco andepts de los cantones de Corredores y Coto Brus*, Tesis de Lic. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 51 pp.
- Madrigal, R. y E. Rojas (1980), *Manual descriptivo del mapa geomorfológico de Costa Rica*. Escala 1:200.000, Secretaría Ejecutiva Planificación Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables, San José, Costa Rica, 78 pp.
- Martínez, J., A. Martín (2003), "Variabilidad espacial del arroz como cultivo indicador de salinidad en regadíos del valle del ebri a partir de series temporales de imágenes Lansat TM", X Congreso de Teledetección y desarrollo regional, Cáceres, España, pp. 40-46.
- Más, F. (1981), *Proyecto fronterizo Costa Rica-Panamá, zona de Coto Sur, Clasificación de suelos y evaluación de tierras*, San José, Costa Rica, p.i.
- Mata, R., A. Rosales, A. Vásquez y D. Sandoval (2013), *Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica*, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Mateu, J. e I. Morell (2003), *Geoestadística y modelos matemáticos en hidrogeología*, Universitat Jaume, Castellón, España, 312 pp.
- McBratney, A., M. Mendonca Santos y B. Minasny (2003), "On digital soil mapping", *Geoderma* núm. 117, pp. 3-52.
- Meléndez, G. y E. Molina (2001), *Fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos en Costa Rica*, Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 139 pp.
- Méndez, J. y F. Bertsch (2012), *Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica*, Asociación Costarricense de la Ciencia de Suelo, San José, Costa Rica, 106 pp.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería) (1980), *Programa de alternativas de producción y propuestas de financiamiento: zona de Puerto Jiménez, península de Osa*. MAG-BNCR-ITCO-CNP-INS, Documento Preliminar, San José, Costa Rica, 81 pp.
- Molina, E. (1998), *Encalado para la corrección de la acidez del suelo*, primera ed., Asociación Costarricense de la Ciencia de Suelo, San José, Costa Rica, 45 pp.
- Monteverde, S., A. Del Pino (2014), "Variabilidad espacial en las propiedades químicas del suelo en un sistema de producción con cerdos en pastoreo", *Ciencias Agronómicas*, vol. 23, núm. 1, pp. 37-45.
- Ovales, F. y J. Rey (1994), "Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de presión del lago de Valencia", *Agronomía Tropical*, vol. 44, núm. 1, pp. 41-65.
- Oliver, M. (1990), "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems", *International Journal of Geographic Information Systems*, núm. 4, pp. 313-332.
- Ortiz, R. A. y M. E. Collins (1992), "Clay mineralogy of alluvial soils from the Pacific Coast of Costa Rica", *Agronomy Abstracts*, p. 361.
- Owen, E. (1992), "Fertilización de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Colombia", *Revista Palmas*, vol. 13, núm. 1, pp. 39-64.
- Pedrosa, J. (1995), *Estudio general de suelos de hacienda La Palma*, La Cuesta, Zona Sur, Costa Rica, p.i.
- Peña, J. (2006), *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*, cuarta ed., Editorial Club Universitario, Alicante, España, 310 pp.
- Ponce, D., P. Pablos, C. Balmaseda y M. Henríquez (1999), "Variabilidad espacial del pH, fósforo y potasio en muestras de suelos con fines de fertilidad en plantaciones de caña de azúcar en Cuba", *Bioagro*, vol. 11, núm. 1, pp. 3-11.
- Porta, J., M. López, C. Roquero de Laburu (2003), *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 917 pp.
- Pose, C., P. González, M. Armesto (2001), "Dependencia espacial de datos topográficos a escalas de ladera y pequeña cuenta agrícola", *Cadernos lab Xeológico de Laxe Coruña*, vol. 26, núm. 1, pp. 191-210.
- Prieto, J., F. Prieto y O. Acevedo (2014), "Variabilidad espacial de la materia orgánica en un suelo dedicado al cultivo de cebada maltera (*Hordeum distichum* L.)", *Revista Facultad Ing. Univ. Antioquia*, vol. 71, núm. 1, pp. 141-152.
- Pyrcz, M. y C. Deutsch (2014), *Geostatistical reservoir modeling*, Oxford University Press, Oxford, Inglaterra, 433 pp.
- Quintero, C., F. Prats, M. Zamero, E. Arévalo, N. Spinnell y N. Boschetti (2011), "Absorción de nitrógeno y rendimiento de arroz con diferentes formas de nitrógeno aplicado previo al riego", *Revista Ciencia del Suelo*, vol. 29, núm. 2, pp. 233-239.

- Ramírez, F. (2008), Validación de niveles críticos de elementos en el suelo y el follaje de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) a partir de una base de datos generada con información experimental y comercial: estudio de caso en Costa Rica, Tesis M.Sc., Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 129 pp.
- Rivera, P., J. Etchevers, C. Hidalgo, B. Castro, J. Rodríguez y A. Martínez (2003), “Dinámica de hierro y zinc aplicados en soluciones ácidas a suelos calcáreos”, *Terra Latinoam.*, Vol. 21, núm. 3, pp. 341-350.
- Ross, M., F. Munévar, F. Ramírez. (2007). Nutrición con magnesio en palma de aceite. *Rev. Palmas* 28(1):419-427.
- Royo, A. (2003), La ocupación sur costarricense por parte de la Compañía Bananera (1938-1984) (en línea), San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. [<http://historia.fcs.ucr.ac.cr/articulos/2003/zonasur.htm>; 2 nov. 2015].
- Scheucher, L. E. A., W. Vortisch y J. Laguna (2008), “Geological and mineralogical investigations of the lithologies and their weathering products in a study area south-west of the field station “La Gamba”, Golfo Dulce, Costa Rica”, en: A. Weissenhofer, W. Huber, V. Mayer, S. Pamperl, A. Weber y G. Aubrecht (eds.), *Natural and cultural history of the Golfo Dulce region*, Costa Rica, Stämpfia 88, pp. 31-45.
- Schloeder, A., E. Zimmerman y J. Jacobs (2001), “Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data”, *Soil Science Society of American Journal*, núm. 65, pp. 470-479.
- Serrano, R. (2003), Introducción al análisis de datos experimentales: tratamiento de datos en bioensayos, Universitat Jaume I, Castellón de la Plana, España, 189 pp.
- Silveira, O., A. Saa, J. Gascó, R. Caballero y F. Guerrero (1999), “Variabilidad temporal de algunas propiedades químicas en un suelo sometido a distintas sucesiones de cultivo”, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 34, núm. 12, pp. 2299-2309.
- Sposito, G. (2008), *The chemistry of soil*, segunda ed., Oxford University Press, EE.UU., 344 pp.
- Stein, M. (2012), *Interpolation of spatial data: some theory for Kriging*, Springer New York, United states of American, 249 pp.
- TAHAL Consulting Engeeniers Ltda. (2000), Estudio de suelos y capacidad de uso de las tierras (escala 1:50.000) para la zonificación agropecuaria de la región Brunca. MAG/MIDEPLAN, San José, Costa Rica, p.1.
- Ulloa, A., T. Aguilar, C. Goicoechea y R. Ramírez (2011), Descripción, clasificación y aspectos geológicos de las zonas kársticas de Costa Rica, *Revista Geología América Latina*, vol. 45, núm. 1, pp. 53-74.
- Valbuena, C., L. Martínez y R. Giraldo (2008), “Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento del mango (*Mangifera indica L.*)”, *Revista Brasileira Fruticultura* vol. 30, núm. 4, pp. 1146-1151.
- Vanmechelen, L., R. Groenemans y E. Van Ranst (1997), *Forest soil condition in Europe: Results of a large-scale soil survey*, Forest Soil Co-ordinating Centre, Bruselas, Bélgica, 261 pp.
- Villalobos, G. (2006), *Mundo laboral y vocabulario bananero en el Pacífico Sur de Costa Rica*, Museo Nacional de Costa Rica, San José, Costa Rica, 24 p.
- Villarreal, J., B. Name, J. Smyth y E. Quirós (2007), “Dosis óptima para la fertilización nitrogenada del arroz, en la región central de Panamá”, *Agronomía Mesoamericana* vol. 18, núm. 1, pp. 115-127.
- Villatoro, M., C. Henríquez y F. Sancho (2008), “Comparación de los Interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial del pH, Ca, CICE y P del suelo”, *Agronomía Costarricense*, vol. 32, núm. 1, pp. 95-105.