

ISÓTOPOS ESTABLES DE COMPUESTOS ESPECÍFICOS PARA ESTIMAR LA REDISTRIBUCIÓN DEL SUELO POR EVENTOS EROSIVOS

COMPOUND-SPECIFIC STABLE ISOTOPES FOR THE ESTIMATION OF SOIL REDISTRIBUTION BY EROSIVE EVENTS

Marisol Ayala-Zepeda¹, Alondra M. Díaz-Rodríguez¹, Renan Cardoso², Marcelo Costa Muniz², Romina Torres-Astorga³, Claudio Bravo-Linares⁴, Roberto Meigikos dos Anjos², Hugo Velasco³, Samuel Tejeda-Vega⁵, Sergio de los Santos-Villalobos^{1*}

¹Instituto Tecnológico de Sonora, Departamento de Ciencias Agronómicas y Veterinarias, México. (sergio.delossantos@itson.edu.mx). ²Universidade Federal Fluminense, Instituto de Física, Brasil. ³Grupo de Estudios Ambientales, Instituto de Matemática Aplicada San Luis. Universidad Nacional de San Luis / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina. ⁴Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Químicas, Chile. ⁵Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México.

RESUMEN

La diversidad biológica en el suelo es amplia y su función ecológica es necesaria para los servicios ecosistémicos que éste provee. Diversas actividades antropogénicas contribuyen a la pérdida de la fertilidad de este recurso y aceleran su erosión. Debido al movimiento del suelo, partículas contaminantes pueden arrastrarse hasta los sitios de depósito (mezclas), lo cual genera consecuencias ambientales y socio-económicas asociadas a la acumulación de los sedimentos. El conocimiento de las fuentes de erosión y sitios de depósito coadyuvará a la toma de medidas para la conservación de los suelos. El objetivo del presente ensayo fue analizar críticamente el estado del conocimiento de la técnica Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI, por sus siglas en inglés), sus fundamentos y la comparación con otras tecnologías. Así, en este manuscrito se discute desde el estado actual de los estudios de la erosión y depósito del suelo hasta su aplicación para la identificación del origen de los suelos depositados en determinados sitios, a través del análisis de la huella isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) de los ácidos grasos de cadena muy larga (22 átomos de carbono o más), idealmente, de la vegetación y el suelo donde crece. Finalmente, se analizan los modelos de mezcla empleados para determinar las proporciones de suelo de cada una de las fuentes en el sitio de depósito, así como un conjunto de otras técnicas cuantitativas. Los autores esperan que este manuscrito contribuya al entendimiento de la problemática actual de la redistribución del suelo debido a la erosión, así como el fundamento, función y

ABSTRACT

Soil biodiversity is wide and its ecological function is necessary for the ecosystem services it provides. Several anthropogenic activities contribute to the loss of this resource's fertility and speed up its erosion. As a consequence of ground movement, polluting particles are dragged to sites of deposition (mixtures), generating environmental and socio-economic consequences associated with sediment accumulation. Being aware of erosion sources and sites of deposition will contribute to take appropriate soil conservation measures. The objective of this essay was to carry out a critical analysis of the current knowledge about the compound-specific stable isotopes (CSSI) technique, its basis, and how they compare with other technologies. Therefore, this essay includes the current state of soil erosion and deposition studies, as well as their application to the identification of deposition soils in certain sites, analyzing the isotopic signature ($\delta^{13}\text{C}$) of very long-chain fatty acids (22 or more carbon atoms). These fatty acids ideally come from the vegetation and the soil in which it grows. Finally, the mixture models used—as well as a set of other quantitative techniques—were analyzed to determine the soil ratio of each source from the deposition zone. The authors hope that this text will contribute to the understanding of the current soil redistribution problem resulting from erosion, as well as of the basis, function, and application of the CSSI technique for the identification of erosion sources, thus helping to prevent this problem through the appropriate implementation of soil conservation measures.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.
Recibido: febrero, 2019. Aprobado: octubre, 2019.

Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 54: 601-618. 2020.

Key words: CSSI, stable isotopes of carbon, soil erosion, soil sources, isotopic signature.

aplicación de la técnica de CSSI para la identificación de las fuentes de erosión, y ayudar así a la prevención de este problema con la toma de medidas de conservación del suelo.

Palabras clave: CSSI, isótopos estables del carbono, erosión del suelo, fuentes de erosión, huella isotópica.

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de la fertilidad de los suelos es indispensable para optimizar los servicios que brindan, como el ciclaje de nutrientes, el soporte a la vegetación y la seguridad alimentaria de la población creciente. Un problema que pone en riesgo la fertilidad de estos recursos es la erosión edáfica. Diversas tecnologías se emplean en el estudio de las causas y consecuencias de la erosión del suelo a diferentes escalas geográficas y temporales. Una de ellas es la técnica Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI, por sus siglas en inglés), la cual representa una herramienta para identificar las principales fuentes de erosión y los sitios de depósito en una cuenca hidrológica. Esta técnica contribuye al establecimiento de medidas de conservación del suelo para evitar que la degradación de los recursos naturales aumente (Gibbs, 2014).

Este ensayo tiene el objetivo de desarrollar un análisis crítico de la técnica de CSSI, sus fundamentos y ventajas en comparación con otras tecnologías. Aquí se detallan los conceptos básicos que se deben tomar en cuenta para entender la importancia del suelo y la problemática que representa su erosión. Además, se analiza la aplicación de la técnica de CSSI en diversos estudios realizados en América Latina y El Caribe, desde que la técnica empezó a emplearse en esta región, en 2014. Los autores esperan que este ensayo sirva como base para el entendimiento de esta técnica isotópica en el idioma español. Así, su uso pueda aplicarse en la investigación y coadyuve a concretar medidas efectivas para la conservación de ecosistemas, a diferentes escalas geográficas.

El suelo es la capa de mineral no consolidado y material orgánico en la superficie terrestre —usualmente contiene sólidos, líquidos, gases y biota—, y está afectado por los procesos físicos, químicos y biológicos (SSSA, 2018). A pesar de su importancia para los servicios ecosistémicos y la vida del ser humano, este recurso natural no suele valorarse (Bertsch y Henríquez, 2015). Sin embargo, el suelo es esencial

INTRODUCTION

Maintaining soil fertility is essential to optimize the services they provide —such as nutrient cycling, vegetation support, and food security for the growing population. Soil erosion is one of the problems that puts the fertility of these resources at risk. Several technologies are used to study the causes and consequences of soil erosion, at different geographic and temporal scales. One of them is the compound-specific stable isotopes (CSSI) technique, a tool that is used to identify main erosion sources and deposition zones in a water basin. This technique contributes to the establishment of soil conservation measures that prevent the increase of the deterioration of natural resources (Gibbs, 2014).

The objective of this essay is to carry out a critical analysis of the CSSI technique, its basis, and advantages compared to other technologies. This study details the basic concepts that must be taken into account to understand the importance of soil and the problems entailed by its erosion. Besides, our team analyzed the application of the CSSI technique since 2014, when the technique was first used in several studies performed in Latin America and the Caribbean. The authors hope that this essay will help to understand this isotopic technique in Spanish-speaking countries. Subsequently, this technique could be applied in researches and help to carry out effective measures to preserve ecosystems, at different geographic scales.

Soil is the layer of unconsolidated mineral and organic material found in the earth's surface; it contains solids, liquids, gases, and biota; and it is affected by physical, chemical, and biological processes (SSSA, 2018). Despite its importance for the ecosystem services and human life, this natural resource is not usually appreciated (Bertsch and Henríquez, 2015). However, soil is essential for the regulation of mass and energy fluxes and their transference between the atmosphere, the biosphere, the hydrosphere, and the lithosphere. Besides, soil helps to regulate the physical processes of the Earth (water and energy balance) and acts as the engine for several biogeochemical cycles on which life depends. Soil is also an important carbon reservoir: it has a higher content of this element than the combination of Earth's atmosphere and vegetation (FAO and ITPS, 2015).

en la regulación del flujo y transferencia de masa y energía entre la atmósfera, la biósfera, la hidrósfera y la litósfera. Además, el suelo ayuda en la regulación de los procesos físicos de la Tierra (balances de agua y energía), y actúa como motor de diversos ciclos biogeoquímicos de los cuales depende la vida. El suelo también es un reservorio importante de carbono debido a que contiene una mayor cantidad de este elemento en comparación con la atmósfera y la vegetación terrestre, en combinación (FAO e ITPS, 2015).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) afirma que “no hay ningún lugar de la naturaleza con una mayor concentración de especies que los suelos”, ya que “albergan la cuarta parte de la biodiversidad de nuestro planeta” (FAO, 2015). Entre estos organismos destacan: bacterias, hongos, protozoarios, nemátodos, ácaros, termitas y lombrices, los cuales son los principales agentes en el ciclaje de nutrientes, la regulación de las dinámicas de la materia orgánica, el secuestro de carbono, y las emisiones de gases efecto invernadero (FAO, 2019).

Entre las funciones más importantes del suelo destaca el sostén y el suplemento de agua y nutrientes para la producción de cultivos agrícolas, que son fuente de alimentos y biocombustibles (Bertsch y Henríquez, 2015), cuya demanda se espera aumente en los próximos años como consecuencia del incremento acelerado de la población. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas está previsto que la población mundial aumente en más de mil millones de personas en los próximos 15 años, por lo que se alcanzarían los 8500 millones en 2030, 9700 millones en 2050 y 11200 millones en 2100 (ONU, 2019). Sin embargo, algunas actividades naturales y antropogénicas contribuyen —en cierto grado— a la pérdida de la fertilidad de este recurso, lo cual afecta el abastecimiento de energía y alimento. Entre ellas destacan las malas prácticas agrícolas (*e.g.* el monocultivo, la aplicación excesiva de agroquímicos, y la quema de residuos de las cosechas), el sobrepastoreo y la deforestación.

Consecuencias de la erosión

Un concepto fundamental para comprender la degradación del suelo es la erosión, la cual se define como el proceso físico que consiste en el desprendimiento y arrastre de los materiales contenidos en él

The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) affirms that “soil is one of nature’s most complex ecosystems and one of the most diverse habitats on Earth: it contains a myriad of different organisms, which interact and contribute to the global cycles that make all life possible” and “soils host a quarter of our planet’s biodiversity” (FAO, 2015). These organisms include: bacteria, fungi, protozoa, nematode, mites, termites, and earthworms, which are the main agents of the nutrient cycling, the regulation of organic matter dynamics, carbon sequestration, and greenhouse gases (FAO, 2019).

Supporting and providing water and nutriment for crop production —which is the source of food and biofuel— is one of the most important functions of the soil (Bertsch and Henríquez, 2015). The demand for these crops is expected to increase during the following years, as a consequence of the rapid population growth. According to United Nations, the world population will increase by one thousand million during the next 15 years, reaching 8500 million, 9700 million and 11200 million in 2030, 2050, and 2100, respectively (ONU, 2019). However, some natural and anthropogenic activities, to a certain degree, contribute to this resource’s loss of fertility, which affects energy and food supplies. Bad agricultural practices (*e.g.*, monoculture, excessive use of agrochemicals, and burning harvest waste), overgrazing, and deforestation stand out among them.

Consequences of erosion

Erosion is a fundamental concept to understand soil degradation: it is a physical process through which soil materials are loosened and carried away by the action of the wind and water, as well as geological processes (SEMARNAT, 2012). Soil erosion redistributes the soil and the organic matter that make up the soil (McCorkle *et al.*, 2016). These erosive processes intensify as a result of anthropogenic causes and result in a major problem, both at the sites where they originate and at the deposition zone to which the soil arrives.

In situ consequences are: 1) the loss of the topsoil; 2) a lower water retention capacity; and 3) the decrease of organic matter, nutrients, microbial resources, and fertility, which leads to their degradation. As a result,

por la acción del viento, agua y procesos geológicos (SEMARNAT, 2012). A través de la erosión edáfica se redistribuye continuamente el suelo y la materia orgánica que lo conforma. Sin embargo, a pesar de su importancia, pocos estudios evalúan las fuentes de carbono que se derivan de la erosión (McCorkle *et al.*, 2016). Estos procesos erosivos se intensifican por causas antropogénicas y contribuyen a un serio problema, tanto para los sitios donde se origina como para los lugares de destino donde este suelo se deposita.

Las consecuencias *in situ* de la erosión son: 1) la pérdida de la capa arable del suelo, 2) una menor capacidad de retención del agua, 3) la disminución del contenido de materia orgánica, nutrientes, recurso microbiano y la fertilidad de los mismos; lo cual conduce a su degradación. Por estas razones, la erosión es la causa principal que contribuye a la degradación edáfica en todo el mundo. Esto cerca de 1900 millones ha (aproximadamente dos tercios de este recurso en el mundo), y representa una pérdida de 75 000 millones t de suelo fértil al año (IAEA, 2015). El efecto neto de los eventos erosivos es la pérdida de la productividad, la cual restringe lo que puede cultivarse, y resulta en una demanda mayor de fertilizantes o el abandono de estos suelos. Lo anterior ocasiona consecuencias negativas para la producción de alimentos, la seguridad alimentaria, y una disminución substancial del valor de la tierra (Morgan, 2005).

Además, debido a que el arrastre de las partículas sucede sin discriminación, durante los procesos erosivos se movilizan diversos agentes contaminantes que se encuentran en los sitios donde ocurre dicho movimiento, tales como: fertilizantes, plaguicidas, metales pesados y desechos orgánicos. Éstos afectan directamente a las zonas de depósito, ya sean cuerpos de agua o suelos ladera abajo. Así, las consecuencias ambientales y socioeconómicas que se asocian a la acumulación de los suelos de depósito *ex situ* son la reducción de la capacidad de almacenamiento de ríos, lagunas y presas, que disminuyen la vida útil de éstas. Lo anterior se debe al proceso de eutrofización, y a la modificación del cauce natural del agua y del hábitat de seres vivos, entre otras razones.

La estimación del movimiento del suelo

La cuantificación de la tasa de erosión y depósito de suelo en un sitio específico no es suficiente para

erosion is the main cause that contributes to edaphic deterioration in the world. This phenomenon affects about 1900 million ha (approximately two thirds of this resource in the world) and represents a 75 000 million t loss of fertile soil per year (IAEA, 2015). The net effect of erosive events is the loss of productivity, which restricts what can be grown and results in a higher demand for fertilizers or the abandonment of those soils. This has negative consequences for food production and food security, along with a substantial decrease in land value (Morgan, 2005).

Additionally, since the entrainment of particles is an indiscriminate phenomenon, erosive processes release various pollutant agents —such as fertilizers, insecticides, heavy metals, and organic waste— that can be found in the sites where those movements take place. These agents directly affect the deposition zones (both water bodies or downhill soils). Therefore, the environmental and socioeconomical consequences associated with the accumulation of *ex situ* soil deposition are the reduction of the storage capacity of rivers, pools, and dams, which diminishes their lifespan. These are some of the consequences of the eutrophication process and the modification of the natural course of water and the habitat of living beings.

Soil movement estimation

The quantification of the erosion and soil deposition rate of a specific site is not enough to carry out actions that preserve this natural resource and mitigate the negative effects on the ecosystem caused by their movement. Therefore, it is important to find out which are the main sediment sources that contribute or have an impact on the final deposition zone (Gibbs, 2014).

Current techniques can estimate or predict soil movement using models based on such variables as torrents, rainfalls, erodibility factor, type of land use, topography, and weather. The Revised Universal Soil Loss Equation 10.6 and 2 (RUSLE1.06 and RUSLE2) stands out among those variables. These prediction technologies are frequently used to estimate erosion rates that cause rainfalls and their associated flux. These equations were mainly developed by the Agricultural Research Service (ARS) and the Natural Resource Conservation Service (NRCS) —both part of the United States

tomar acción dirigida a la conservación de este recurso natural, y la mitigación de los efectos negativos al ecosistema por su desplazamiento. Por lo tanto, es necesario conocer las principales fuentes de sedimentos que contribuyen o impactan al sitio del depósito final (Gibbs, 2014).

Las técnicas actuales permiten estimar o predecir el movimiento del suelo mediante el uso de modelos basados en variables, como escorrentía, precipitaciones, factor de erosionabilidad, tipo de uso del suelo, topografía, y clima. Entre ellas destaca la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada 1.06 y 2 (RUSLE1.06 y RUSLE2, siglas en inglés de 'Revised Universal Soil Loss Equation', versiones 1.06 y 2). Estas tecnologías de predicción se usan con frecuencia para estimar tasas de erosión que causan las precipitaciones y su flujo asociado. Estas ecuaciones se desarrollaron principalmente por el Servicio de Investigación Agrícola (ARS, por sus siglas en inglés) y el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés), ambos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), así como la Universidad de Tennessee, entre otras instituciones de prestigio (USDA, 2016). Otro método utilizado es la medición directa; por ejemplo, el uso de bolsas de malla que se colocan sobre la superficie del suelo, y permite conocer su depósito o pérdida en los sitios de estudio después de uno o varios eventos erosivos (Hsieh *et al.*, 2009). Además, la química de los sedimentos también se utiliza en la determinación de sus orígenes. Esta técnica consiste en el análisis de disoluciones de hierro, fósforo, carbono, nitrógeno y manganeso de un suelo, y de muestras de sedimento suspendido, a través de un modelo de mezcla simple (Rhoton *et al.*, 2008). La susceptibilidad magnética de los suelos también permite identificar y cuantificar sus minerales (Bautista *et al.*, 2014), y relacionarlos con los eventos erosivos, lo cual permite delimitar las zonas afectadas por sedimentos contaminados con elementos de naturaleza tóxica como el arsénico, cadmio y plomo (Pérez-Martínez y Romero, 2015). Un enfoque adicional, es el empleo de la mineralogía del sedimento suspendido; sin embargo, esta metodología puede ocasionar problemas al emplearla de forma aislada, porque las arcillas son las partículas que principalmente se transportan de la superficie del suelo en erosión (Rhoton *et al.*, 2008).

Las técnicas ya mencionadas presentan limitaciones para la estimación del movimiento del suelo

Department of Agriculture (USDA)—, as well as the University of Tennessee, among other top academic institutions (USDA, 2016). Another method used is direct measurement: for example, placing mesh bags on the soil surface to find out the deposition or loss of the study sites, after one or several erosive events (Hsieh *et al.*, 2009). Additionally, sediment chemistry is also used to determine their origins. This technique analyzes iron, phosphorus, carbon, nitrogen, and manganese solutions from a given soil, as well as suspended sediment samples, using a simple mixture model (Rhoton *et al.*, 2008). The magnetic susceptibility of soil is another technique that identifies and quantifies minerals (Bautista *et al.*, 2014) and connects them with erosive events, thus delimiting the zones that have been affected by sediments polluted with toxic elements, such as arsenic, cadmium, and lead (Pérez-Martínez and Romero, 2015). An additional approach is suspended sediment mineralogy; however, this methodology can cause problems if used in isolation, because clay are the main particles that are removed from the surface of the eroded soil (Rhoton *et al.*, 2008).

As a result of the lack of historic field data and information, the use of the above-mentioned techniques to estimate soil movement at large scale faces limitations when the differences among potential erosion sources need to be established. Geographic information systems (GIS) is a technology that — through the processing of georeferencing information obtained from satellite imagery— allows the analysis of soil variations during various periods (days to years), depending on the satellite. The National Institute of Statistics and Geography (INEGI) defines GISs as: “a set of tools designed to obtain, store, recover, and display spatial data from the real world”. This technique allows researchers to evaluate large-scale temporary and spatial erosion and to implement models; however, one of its disadvantages is its inaccuracy (INEGI, 2014).

Isotopic techniques

The use of isotope-based techniques has been explored to study soil movement caused by erosive events. Isotopes are atoms with the same number of protons, but with different number of neutrons in their nucleus; therefore, their mass is different (Kendall and Caldwell, 2012). This difference does not affect the chemical properties of the element

a grandes escalas, debido a la falta de datos históricos en campo e información para distinguir entre las potenciales fuentes de erosión. De esta manera, los sistemas de información geográfica (SIG) son una tecnología que, a través del procesamiento de información georreferenciada obtenida de imágenes satelitales, permite analizar las variaciones del suelo en periodos que comprenden desde días hasta años (según el satélite). El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) define a los SIG como: “un conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real”. Estos permiten evaluar la erosión a escalas temporales y espaciales amplias e implementar modelos, pero una de sus desventajas es su inexactitud (INEGI, 2014).

Las técnicas isotópicas

Para el estudio del movimiento del suelo por eventos erosivos se explora el uso de técnicas basadas en isótopos, los cuales son átomos con el mismo número de protones pero difieren en la cantidad de neutrones en su núcleo, por lo cual tienen masa desigual (Kendall y Caldwell, 2012). Esto no afecta las propiedades químicas del elemento y sus compuestos, pero sí causa sutiles diferencias físicas que dan como resultado el fraccionamiento isotópico (Sharp, 2017). En la naturaleza existen isótopos radiactivos e isótopos estables. Los primeros decaen espontáneamente, y emiten partículas alfa, beta o gamma, es decir, se transforman en otro elemento estable si el decaimiento radioactivo se detiene, o inestable si el decaimiento continúa hasta alcanzar un estado estable (Lewin y Goldstein, 2011), *e.g.* el decaimiento beta del ^{14}C , que decae a su forma estable como ^{14}N (Raven, 2002). Los isótopos estables no decaen a otro núclido y permanecen con sus características naturales (*e.g.* ^{13}C y ^{12}C).

Una técnica con relevancia en el estudio de la erosión del suelo es la FRN, siglas en inglés de radionúclidos de depósito atmosférico (‘fallout radionuclides’), los cuales se utilizan para estimar las tasas de erosión o sedimentación de suelo. Los FRN con mayor uso como trazadores del movimiento del suelo son :1) el ^{137}Cs , cuyo origen data de las pruebas de armas termonucleares en las décadas de 1950 a 1960, y es el más usado para la evaluación de la erosión del suelo a mediano plazo (50 años); 2) el

and its compounds, but it does cause subtle physical differences that result in isotopic fractionation (Sharp, 2017). Radioactive and stable isotopes can be found in nature. The former spontaneously decay and emit alpha, beta, or gamma particles: *i.e.*, they turn into another stable element—if the radioactive decay stops—or unstable element—if the decay continues until it reaches a stable state (Lewin and Goldstein, 2011). For example, the beta decay ^{14}C stabilizes as ^{14}N (Raven, 2002). Stable isotopes do not decay into another nuclide and keep their natural characteristics (*v.gr.*, ^{13}C y ^{12}C).

Another outstanding technique used to study soil erosion is the Fallout Radionuclides (FRN) technique, which estimates the erosion or sedimentation rates of the soil. The most frequently FRNs used to trace the movement of soil are: 1) ^{137}Cs , whose origin dates back to the thermonuclear weapons tests of the 1950s and 1960s and is used to evaluate medium-term soil erosion (50 years); 2) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, which has a geogenic origin and is used in long-term soil and sediment redistribution studies (100 years); 3) ^7Be , which has a cosmogenic origin and is used as a short-term tracer (1 day to a maximum of three months) (Mabit *et al.*, 2014). Some of the many outstanding advantages of the use of these radioactive isotopes include: they can be found in the environment of the whole world; they are easily measured; their erosion estimations are retrospective; and they can be obtained in a single visit to the study site, during a very relative short process (Mabit *et al.*, 2014). However, these techniques provide scarce information about the origin of the sediments that are deposited on the study soils, which is vitally important for the design of efficient soil conservation strategies.

Compound-specific stable isotopes (CSSI)

Stable isotopes also have potentiality as a natural tracer of the organic matter origin. Its usefulness is based on the potential differences of the isotopic signatures between several soil erosion sources. Additionally, these signatures are relatively well preserved during the mineralization, transport, and sedimentation of the soil (Bouillon *et al.*, 2011).

Gibbs (2008) developed the CSSI technique to identify the origin of soils in deposition zones, to determine the erosion source, and to establish several conservation measures. These techniques use stable

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ de origen geogénico usado en estudios de redistribución del suelo y sedimento a largo plazo (100 años); y 3) el ^7Be , de origen cosmogénico y se utiliza como trazador para corto plazo (días a máximo tres meses) (Mabit *et al.*, 2014). Las ventajas del uso de estos isótopos radiactivos son muy variadas, entre las cuales destacan su presencia en el ambiente de todo el mundo, se miden con facilidad, sus estimaciones de erosión son retrospectivas y se pueden obtener en una sola visita al sitio de estudio, y en un periodo relativamente corto (Mabit *et al.*, 2014). Sin embargo, estas técnicas aportan información escasa del origen de los sedimentos que se depositan en los sitios de estudio, lo cual es de vital importancia para diseñar estrategias eficientes de conservación de suelo.

Isótopos estables de compuestos específicos (CSSI)

Los isótopos estables también ofrecen posibilidades como trazadores naturales del origen de la materia orgánica. Su utilidad se basa en las potenciales diferencias en las huellas isotópicas entre varias fuentes de erosión del suelo y, además, estas huellas son relativamente bien preservadas durante la mineralización, transporte y sedimentación del suelo (Bouillon *et al.*, 2011).

Gibbs (2008) desarrolló la técnica de CSSI para identificar el origen de los suelos en sitios de depósito, determina las fuentes de erosión y permite el establecimiento de diversas medidas de conservación. Los isótopos estables utilizados en esta técnica corresponden al Carbono, es decir, ^{13}C y ^{12}C . Los compuestos de interés son los ácidos grasos (AG), idealmente, aquellos de cadenas larga, de 22 carbonos o más. El neutrón extra del ^{13}C lo hace más pesado y lento que el ^{12}C , por lo cual, al atravesar una pared o compartimiento celular se obtiene ligeramente más ^{13}C en el lado inicial, y ligeramente más ^{12}C al llegar al otro. Este proceso se conoce como fraccionamiento isotópico (Gibbs, 2014). Así, las concentraciones de ^{13}C y ^{12}C debido al fraccionamiento serán diferentes en 1 parte por 1000 (1‰), por cada evento de fraccionamiento o paso trófico. De esta manera, el contenido de ^{13}C inicial es isotópicamente enriquecido en 1‰, mientras que el contenido de este isótopo en el destino se reduce isotópicamente en 1‰, lo cual se expresa en términos del isótopo pesado (Gibbs, 2014). Para facilitar la interpretación de esta diferencia de

isotopes of carbon: *i.e.*, ^{13}C and ^{12}C . The compounds of interest are fatty acids (FAs) —ideally, long-chain FAs, of 22 or more carbons. The extra neutron of ^{13}C makes it heavier and slower than ^{12}C ; therefore, when it goes through a cell wall or compartment, slightly more ^{13}C is obtained on the initial side and slightly more ^{12}C when it reaches the other side. This process is known as isotopic fractionation (Gibbs, 2014). Therefore, the ^{13}C and ^{12}C concentrations during fractionation will be different in 1 part per 1000 (1‰) per each fractionation event or trophic step. This way, the initial ^{13}C content is isotopically enriched by 1‰, while the content of this isotope at the destination is isotopically diminished by 1‰, which is expressed as a heavy isotope (Gibbs, 2014). To facilitate the interpretation of this difference, this concentration is compared using an international standard, which has a known and unchanging proportion from ^{13}C to ^{12}C . This standard is a limestone known as Pee Dee Belemnite (PDB) from South Carolina (NOAA, 2019); although the original PDB specimen has already ran out for this use, other standards were calibrated to the same ratio (*v.gr.*, VPDB (Vienna PDB)). The isotopic difference between heavy and light isotopes can be expressed in delta notation (δ). The δ value is calculated using the following equation:

$$\delta^{13}\text{C} = 1000 \cdot \left(\frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} - 1 \right) \text{‰} \quad (1)$$

where:

R is the molar ratio of the heavy *vs* the light isotope ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) and the standard is the VPDB (R of 0.01118‰). The $\delta^{13}\text{C}$ value of a sample is known as isotopic signature and it is expressed in units per thousands (‰).

The CSSI technique is based on the typical definition of land use as the plant community that grows in that space. Plants produce a variety of organic compounds that can be incorporated into the soil as biomarkers of that vegetation; therefore, the organic compounds produced by every plant must be strongly linked to soil particles and must be able to distinguish different species or vegetal communities. The chosen biomarkers are common fatty acids (FAs) (Gibbs *et al.*, 2015); all plants produce the same fatty

concentración se compara con un estándar internacional, el cual tiene una proporción conocida e inmutable de ^{13}C a ^{12}C . Este estándar es una caliza llama Pee Dee Belemnite (PDB) de Carolina del Sur (NOAA, 2019), y aunque el espécimen original de PDB ya se agotó para este uso, otros estándares se calibraron a la misma relación, *e.g.* uno conocido como VPDB (Vienna PDB). La diferencia isotópica entre el isótopo pesado y ligero se expresa en notación delta (δ). El valor δ se calcula con la siguiente ecuación:

$$\delta^{13}\text{C} = 1000 \cdot \left(\frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} - 1 \right) \text{‰} \quad (1)$$

donde:

R es la relación molar del isótopo pesado *vs.* el ligero ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) y el estándar es la VPDB (R de 0.01118‰). Al valor $\delta^{13}\text{C}$ de una muestra se le denomina huella isotópica y se expresa en unidades por mil (‰).

La técnica de CSSI se basa en que el uso del suelo típicamente se define por la comunidad de plantas que crecen en ese espacio. Las plantas producen una variedad de compuestos orgánicos que pueden unirse al suelo como biomarcadores de esa vegetación, por lo cual, dichos compuestos orgánicos producidos por todas las plantas deben estar fuertemente ligados a las partículas del suelo, y ser capaces de distinguir diferentes especies o comunidades vegetales. Los biomarcadores de elección son los AG comunes (Gibbs *et al.*, 2015), todas las plantas producen los mismos ácidos grasos, pero con una huella isotópica diferente. Al inicio, se sugirió el uso de los AG de cadena larga, de 14 a 24 átomos de carbono, de número par (*e.g.* ácido mirístico C_{14} , ácido palmítico C_{16} , ácido esteárico C_{18}). Sin embargo, Reiffarth *et al.* (2016), después de un análisis basado en información disponible en la literatura, sugirieron utilizar como biomarcadores los AG saturados de cadena muy larga. Éstos contienen 22 carbonos o más en cada cadena y son principalmente de origen vegetal. Además, se sugirió evitar el uso de los AG saturados ubicuos (C_{16} y C_{18}), y seleccionar los AG saturados debido a que los insaturados pueden atravesar procesos de transformación ocasionados por su grado de insaturación, como la auto-oxidación.

Al ocurrir los eventos erosivos, los suelos marcados con la huella isotópica de los AG provenientes de

acids, but with different isotopic signatures. At the beginning, the use of even-numbered long chain fatty acids (14 to 24 carbon atoms) was suggested—such as myristic acid C_{14} , palmitic acid C_{16} , and stearic acid C_{18} . However, having analyzed the information available on the literature, Reiffarth *et al.* (2016) suggested using very long-chain saturated fatty acid as biomarkers. They have 22 carbons or more in each chain and mainly have a vegetal origin. Additionally, avoiding the use of ubiquitous saturated fatty acids (C_{16} and C_{18}) and choosing the saturated FAs was suggested: unsaturated fatty acid can undergo transformation processes as a result of their unsaturation degree (for example, auto-oxidation).

When erosive events take place, soils marked with the isotopic signature of FAs from their specific vegetation become mixed and reach the deposition zones. This is why land uses that undergo an erosion are called “sources”, while deposition zones are called “mixtures”. The latter’s soil is studied to trace the contribution of each source, analyzing the CSSI values in a mixing model.

This technique requires specific considerations to maximize its sensibility, ranging from safety and hygiene measures, sample collection, transport, and protection to lab analysis. Some of these considerations include: 1) using gloves; 2) labelling each sample in detail; and 3) transporting the sample in a cold and dark container, in order to reduce the microorganism action that could alter the results of the isotopic ratio.

Additionally, enough information of the study site is required (*v.gr.*, elevation maps, land topography, land types and uses, geographic location, and information directly obtained from local producers, inhabitants or both) to justify the selection of the sample places and their duly classification into mixtures and sources (Figure 1).

The CMO, %MO, %C, AG, and EMAGs acronyms mean organic matter content (OMC), organic matter percentage (%OM), carbon percentage (%C), fatty acids (FAs), and fatty acid methyl esters (FAMES), respectively.

Planning is the first step of the CSSI technique; during this stage a list of the sites to be analyzed is developed and mixtures and possible sources are differentiated. Once the sites are located, the protocol suggested by Gibbs (2014) must be

su vegetación específica, se mezclan y llegan hasta los sitios de depósito. Por esta razón, los usos de suelo que sufren erosión se llaman “fuentes”, y a los sitios de depósito se los denomina “mezcla”. El suelo de estas últimas se estudia para rastrear las contribuciones de cada fuente, a través del análisis de los valores de CSSI en un modelo de mezcla.

Esta técnica requiere consideraciones específicas para maximizar su sensibilidad, las cuales incluyen desde medidas seguridad e higiene, recolección de muestras, transporte y resguardo, hasta el análisis en laboratorio. Algunas de estas consideraciones son: 1) el uso de guantes, 2) etiquetar con detalle cada muestra, y 3) transportarlas en frío y oscuridad, para reducir la acción de microorganismos que pudiera alterar el resultado de relación isotópica.

Además es necesario tener información suficiente del sitio de estudio (*e.g.* mapas de elevación, topografía del terreno, tipos y usos de suelo, su ubicación geográfica e información que se obtenga directamente de los productores o habitantes de la zona o ambos) que justifique la selección de los lugares a muestrear y su debida clasificación en mezclas y fuentes (Figura 1).

Las siglas CMO, %MO, %C, AG, EMAGs corresponden a contenido de materia orgánica, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de carbono, ácidos grasos, y ésteres metílicos de los ácidos grasos, respectivamente.

followed. Ten samples must be taken in a grid pattern—at a depth of 2 cm and 5 m apart from each other—and homogenized in a container to obtain a representative sample of each source or mixture. Rocks, sticks, insects, or vegetal material should be removed. Subsequently, the samples must be freeze-dried (lyophilization) in an oven at 60 °C, until they reach a constant weight; a quality guarantee sample can be added at this point (*e.g.*, an aliquot of the soil that is already analyzed). Afterwards, the sample must be heated at 450 °C to measure the organic carbon percentage (%C) in about 5 g of dried sample; after 3 h, the sample is weighted once again. The total organic matter content (CMO) is calculated as mass loss on ignition, after subtracting the original weight from the final weight of the sample. One option to calculate the carbon percentage of the dry sample (%C) is to multiply CMO by 0.47, because the approximate carbon content of the vegetal dry matter is 47%, but changes depend on the type of soil.

The removal of inorganic carbon is a determinant factor in this process; therefore, adding 2-5 mL of HCl at 10% acidifies the sample (this procedure is not necessary for acid soils), causing a CO₂ emission. This procedure must be replicated until no more bubbles are observed. In order to eliminate the acid, distilled or deionized water must be added to the acidified sample; then, the sample is centrifuged at 3000 rpm during 10 min, the liquid is removed,

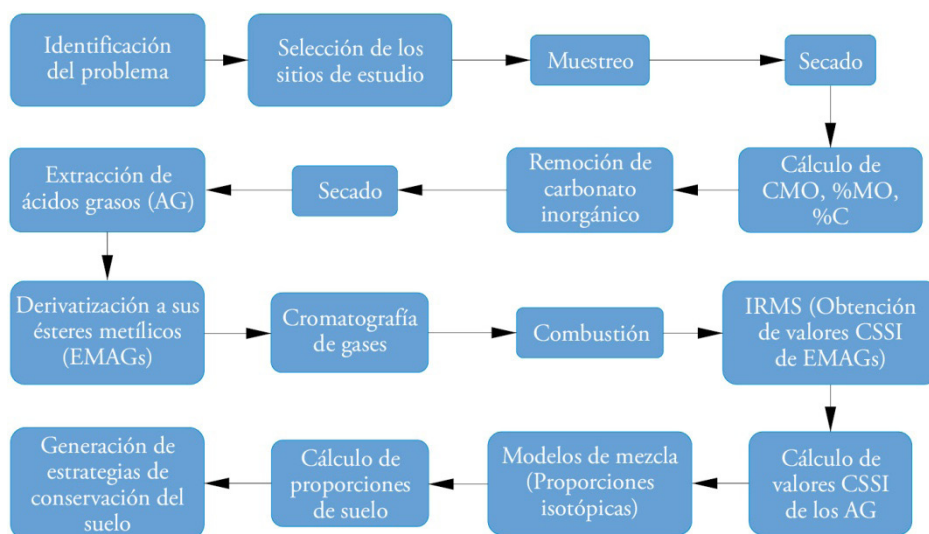


Figura 1. Flujo de trabajo para el uso de la técnica de CSSI.
Figure 1. Work flow for the use of the CSSI technique.

El primer paso para utilizar la técnica de CSSI es la planeación, en la cual se enlistan los sitios a analizar y se discrimina entre mezclas y posibles fuentes. Una vez ubicados los sitios, se sigue el protocolo sugerido por Gibbs (2014). Diez muestras se toman en un patrón de cuadrícula, a 2 cm de profundidad, con separación de 5 m entre ellas y se homogenizan en un recipiente para obtener una muestra representativa de cada fuente o mezcla. Es importante remover rocas, palos, insectos o material vegetal. Luego, las muestras se secan por liofilización en un horno a 60 °C hasta peso constante y una muestra de garantía de calidad se puede añadir en este punto, la cual puede ser una alícuota de suelo ya analizado. Después, se mide el porcentaje de carbono orgánico (%C) en unos 5 g de muestra seca, para lo cual la muestra se calienta a 450 °C por 3 h y se pesa de nuevo. El contenido de materia orgánica total (CMO) se calcula como la pérdida de la masa por ignición luego de restar el peso original menos el peso final de la muestra. Se sugiere calcular el porcentaje de carbono de la muestra seca (%C) al multiplicar el CMO y 0.47, porque el contenido aproximado de carbono en la materia vegetal es 47%, pero varía según el tipo de suelo.

La remoción del carbonato inorgánico es determinante en este proceso, por lo cual la muestra se acidifica al añadir 2 a 5 mL de HCl al 10% (procedimiento que no es necesario para los suelos ácidos), lo cual causa la liberación de CO₂. Este procedimiento se debe repetir hasta que no se observe burbujeo. Para eliminar el ácido se agrega agua destilada o desionizada a la muestra acidificada, se centrifuga a 3000 rpm por 10 min, se descarta el líquido, y se repiten estos últimos tres pasos. Después, la muestra se seca en un horno a 60 °C y se traslada en tubos al laboratorio analítico para medir el valor isotópico del contenido de ¹³C orgánico en la muestra ($\delta^{13}\text{C}$), y el porcentaje de carbono.

El siguiente paso es la extracción de los AG de la muestra seca y acidificada (con extracción acelerada de disolventes u otras técnicas de extracción equivalentes). Para ello se usa diclorometano (DCM) como disolvente, o su combinación con otros solventes de extracción de grado HPLC (siglas en inglés de cromatografía líquida de alta eficacia), por ejemplo, el metanol (CH₃OH) (Blake *et al.*, 2018). Después, se añade un grupo metilo (CH₃) en lugar del grupo

and the last three steps are repeated. After that, the sample is dried in an oven at 60 °C and carried on test tubes to the analytical lab, where the ¹³C organic content isotopic value and the carbon percentage of the sample ($\delta^{13}\text{C}$) are measured.

The following step is the extraction of FAs from the dry and acidified sample (using the accelerated solvent extraction or other similar extraction techniques). This technique uses dichloromethane (DCM) as solvent or its combination with other High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) degree extraction solvents, such as methanol (CH₃OH) (Blake *et al.*, 2018). Since fatty acids are polar and join any ionic surface [stationary phase of the column chromatography (Gibbs, 2014)], a methyl group (CH₃) is added instead of the acid group, in order to derivatize the FA to its methyl ester or FAME. This process is also known as methylation. To carry out this process, a catalyst must be used, preferably a boron trifluoride solution (BF₃) in 5% methanol (v/v) (Bravo-Linares *et al.*, 2018).

The derivatized samples are analyzed to find out the $\delta^{13}\text{C}$ values of the FAMES and of the methanol used during the derivatization stage (Gibbs, 2014). In order to carry out this analysis, a gas chromatography-combustion coordinated-isotope ratio mass spectrometry (GC-C-IRMS) is used. A prerequisite to use this equipment is that the compounds of the sample are volatile and thermally stable and, therefore, the samples are derivatized first and the derivatization agent's relative isotope ratio must also be determined. In addition, internal calibration standards (C12:0 or C13:0) are added, along with the reference mixtures for the calculation of the $\delta^{13}\text{C}$ of the FAME of each sample (Bravo-Linares *et al.*, 2018). In the GC-C-IRMS, the sample is transported with ultra-high purity helium through the chromatography column. The CO₂ resulting from the combustion is directed towards the equipment's ion source. For the $\delta^{13}\text{C}$ analysis, CO₂ ions with different masses are detected, as a result of each molecule's own isotopic composition. Therefore, the IRMS is used to determine the ¹³C/¹²C rate ($\delta^{13}\text{C}$ or isotopic signature) of the FA plus the methanol used for the derivatization. Since the isotopic value of the FAME is different for each FA, a correction must be made for each one, using the following formula:

ácido, para derivatizar los AG a sus ésteres metílicos o EMAGs, porque los ácidos grasos son polares y se unen a cualquier superficie iónica [fase estacionaria de la columna cromatográfica (Gibbs, 2014)]. Este proceso también se llama metilación. Para realizar este proceso es necesario usar un catalizador, de preferencia una solución de trifluoruro de boro (BF_3) en metanol al 5% (v/v) (Bravo-Linares *et al.*, 2018).

Las muestras derivatizadas son analizadas para conocer los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de los EMAGs y del metanol utilizado en la etapa de derivatización (Gibbs, 2014). Para este análisis se usa un cromatógrafo de gases por combustión acoplado a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (GC-C-IRMS, por sus siglas en inglés). Un prerrequisito para utilizar este equipo es que los compuestos de la muestra sean volátiles y térmicamente estables, por esta razón las muestras primero se derivatizan, y la relación isotópica relativa del agente de la derivatización también se debe determinar. Además, se añaden estándares internos calibrados (C12:0 o C13:0) y mezclas de referencia para los cálculos de $\delta^{13}\text{C}$ de los EMAGs a cada muestra (Bravo-Linares *et al.*, 2018). En el GC-C-IRMS, la muestra se transporta con gas helio ultrapuro a través de la columna cromatográfica. El CO_2 que resulta de la combustión se dirige a la fuente de iones del equipo. Para los análisis de $\delta^{13}\text{C}$ se detectan iones de CO_2 con masas diferentes debido a la composición isotópica propia de cada molécula. Así, mediante el IRMS se determina la proporción $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$ o la huella isotópica) del AG más el metanol utilizado para la derivatización. Debido a que el valor isotópico del EMAG es diferente en cada AG, se debe realizar una corrección por cada uno, con la fórmula siguiente:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{AG}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{EMAG}} - (1 - X)\delta^{13}\text{C}_{\text{Metanol}}}{X} \quad (2)$$

donde:

$\delta^{13}\text{C}_{\text{AG}}$ es el valor isotópico del ácido graso.

X es la contribución fraccional del ácido graso al EMAG. X se calcula al dividir el número de carbonos en el AG entre el número de átomos de carbono presentes en el EMAG, *e.g.* el ácido esteárico (C_{18}) tiene 18 átomos de carbono, mientras el EMAG producido, metilo estearato, tiene 19 (incluye un átomo de carbono añadido del metanol). X tiene un valor de 18/19 ó 0.9474.

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{AG}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{EMAG}} - (1 - X)\delta^{13}\text{C}_{\text{Metanol}}}{X} \quad (2)$$

where:

$\delta^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ is the isotopic value of the fatty acid.

X is the fractional contribution of the fatty acid to the FAME. X is calculated by dividing the number of carbons in the FA by the number of carbon atoms in the FAME, *e.g.*, stearic acid (C_{18}) has 18 carbon atoms, while the resulting FAME (stearate methyl) has 19 (including a carbon atom provided by the methanol). X has a value of 18/19 or 0.9474 (Gibbs, 2014).

$\delta^{13}\text{C}_{\text{FAME}}$ is the isotopic value of the methyl ester of the AG.

$\delta^{13}\text{C}_{\text{Methanol}}$ is the isotopic value of methanol.

The data obtained was analyzed using mixture models that use the CSSI value data of the sample's FAs and ^{13}C to estimate the proportional contribution of each one to the mixtures. The analysis provides information about a basin's erosion sources. The most frequently used mixing model-based software is IsoSource (Phillips and Gregg, 2003) and SIAR (Parnell *et al.*, 2010). These programs can be used to calculate the isotopic ratio of the data obtained using the CSSI technique. However, there are some problems with the estimation of soil redistribution when those software programs are used. For example: IsoSource restricts the number of isotopes, sources, and mixtures that can be analyzed, which limits the study of larger areas; meanwhile, SIAR is a math tool that imposes limitations to the input and output of data. In addition, the users of both programs need to do calculations before and after using them, such as: isotopic correction by derivatization and soil ratio calculation of each source of the deposition zones (de los Santos-Villalobos *et al.*, 2015). An advantage of SIAR over IsoSource is that its results include uncertainty and it works very well for large groups of data; however, inexperienced users can find it hard to analyze and understand its data. In that sense, some consideration must be taken into account before running SIAR, because it will always try to adjust to a model, even if the sources are outside the isotopic mixture polygon (Parnell *et al.*, 2010). Another factor that must be taken into account is that the results represent possible solutions.

$\delta^{13}\text{C}_{\text{EMAG}}$ es el valor isotópico del éster metílico del AG.

$\delta^{13}\text{C}_{\text{Metanol}}$ es el valor isotópico del metanol.

Los datos obtenidos se analizan bajo modelos de mezcla que usan datos de valores de CSSI de los AG y del ^{13}C de la muestra, para estimar la contribución proporcional de cada uno de éstos en las mezclas. Lo anterior proporciona información acerca de las fuentes de erosión en una cuenca. Los programas más comunes basados en modelos de mezcla son IsoSource (Phillips y Gregg, 2003) y SIAR (Parnell *et al.*, 2010). Éstos se pueden usar para calcular proporciones isotópicas de los datos obtenidos por la técnica de CSSI. Sin embargo, dichos programas presentan algunos inconvenientes para estimar la redistribución de suelo. Por ejemplo, IsoSource restringe el número de isótopos, fuentes y mezclas a analizar, lo que limita el estudio de grandes áreas; y SIAR es una herramienta matemática que presenta limitantes en la entrada y salida de datos. Además, en ambos programas, los usuarios necesitan desarrollar cálculos antes y después de usarlos, como: corrección isotópica por la derivatización, cálculo de las proporciones de suelo de cada fuente en los sitios de depósito (de los Santos-Villalobos *et al.*, 2015). Una ventaja de SIAR sobre IsoSource es que sus resultados incluyen incertidumbre y funciona muy bien con conjuntos numerosos de datos, pero no son fáciles de analizar e interpretar por inexpertos. En ese sentido, algunas consideraciones se deben tomar en cuenta antes de utilizar SIAR, por ejemplo, revisar la información a detalle antes de correr el programa, debido a que siempre intentará ajustarse a un modelo, incluso si las fuentes están fuera del polígono de mezcla isotópico (Parnell *et al.*, 2010). Además, se debe considerar que los resultados representan soluciones probables.

Es importante mencionar que los resultados de los modelos de mezcla (IsoSource y SIAR) son proporciones isotópicas y no proporciones de suelo de cada fuente presente en la mezcla. Es decir, estos modelos proveen información sobre la proporción de cada suelo de origen requerido para obtener un balance isotópico con la muestra de sedimento, basada en las huellas isotópicas del ^{13}C de toda la muestra y los biomarcadores de AG en los suelos de origen y el sedimento (Gibbs, 2014). Por ello, es necesario convertirlos a proporción de suelo, con la fórmula siguiente:

It is important to mention that the results of the mixture models (IsoSource and SIAR) are isotopic ratios, rather than the soil ratios of each source present in the mixture: *i.e.*, these models provide information about the proportion of each origin soil—which is required to obtain an isotopic balance—to the sediment sample, based on the isotopic signatures of ^{13}C in the whole sample, and FA biomarkers in the origin soils and sediment (Gibbs, 2014). Subsequently, they must be converted to a soil ratio, using the following formula:

$$\% \text{fuente}_n = \frac{\frac{I_n}{\%C_n}}{\sum_n \left(\frac{I_n}{\%C_n} \right)} \cdot 100 \quad (3)$$

where:

$\% \text{ source}_n$ is the soil ratio of the n source,

I_n is the average isotopic ratio of the n source in the mixture, estimated from the carbon's isotopic values according to the mixture model.

$\% C_n$ is the carbon percentage of the n source of the soil (Gibbs, 2014).

Based in some of the limitations of the above-mentioned mixture models, CSSIAR v2.00 software was developed to evaluate soil redistribution, using the CSSI technique, in sedimentation areas with different sources. This open source code software in R (an extensible language and environment for statistical and computing and graphics) is based in the Bayesian approach of SIAR. It solves mixture models with stable isotopes, but utilizing a user-friendly interface (de los Santos-Villalobos *et al.*, 2017), which enables the analysis of large amounts of sources, mixtures, and isotopes in a simpler and quicker way. Therefore, CSSIAR v2.00 can be used to study a large number of samples from a basin, in a very short time.

Figure 2 shows the main work screen of the CSSIAR v2.00 software. The name of the project must be written on box number 1; the name of the file in which the results will be generated must be written on box number 2. Boxes numbers 3 and 4 are used to open the text files with the CSSI values of the mixtures and the sources, respectively; box number 5 is used to indicate whether or not they include a standard deviation. If the standard deviation is not

$$\% \text{fuente}_n = \frac{\frac{I_n}{\%C_n}}{\sum_n \left(\frac{I_n}{\%C_n} \right)} \cdot 100 \quad (3)$$

donde:

$\% \text{fuente}_n$ es la proporción de suelo de la fuente n ,
 I_n es la proporción isotópica media de la fuente n en la mezcla, estimada a partir de los valores isotópicos del carbono por el modelo de mezcla.
 $\%C_n$ es el porcentaje de carbono en la fuente n de suelo (Gibbs, 2014).

Con base en algunas de las limitaciones de los modelos de mezcla anteriores, y con el objetivo de evaluar la redistribución del suelo en áreas de sedimentación provenientes de diferentes fuentes con el uso de la técnica de CSSI, se desarrolló el programa CSSIAR v2.00. Este programa de código abierto en R (ambiente para la computación estadística y gráfica, extensible a través de paquetes), se basa en el enfoque bayesiano de SIAR para resolver modelos de mezcla con isótopos estables, pero bajo una interfaz amigable con el usuario (de los Santos-Villalobos *et al.*, 2017), lo cual permite analizar grandes cantidades de fuentes, mezclas e isótopos de una manera más sencilla y rápida. Así, es posible utilizar CSSIAR

included in the said file, it should be indicated in space number 6; if polygon graphics need to be generated, it should be pointed out in space number 7. The FAs with which the analysis will be carried out are determined in number 8 and they can be chosen in combinations of 2 or more. The sources that will be analyzed must be specified in number 9, while the carbon content file must be chosen in number 10. Number 11 will be used to indicate if the program will be run again with the same or different files. Finally, the methanol correction is carried out based on the option marked with number 12.

Some of the improvements that were made to this software include: 1) the packages that are required for a proper operation are automatically installed; 2) the software enables the analysis of the results of the isotopic signatures of the sources and the mixtures, as well as of %C and FAMES, through text files; and 3) the software can operate even with missing data (lost data). Additionally, if the sources do not include a standard deviation, it can be included by hand. Likewise, all or only some of the sources — as well as the $\delta^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ (isotopic values of the FAs)— can be analyzed. The interaction between each pair of isotopic values with the mixtures and sources is represented in graphics which enable a simple visual interpretation, helping the user to correctly identify the data that must be analyzed.

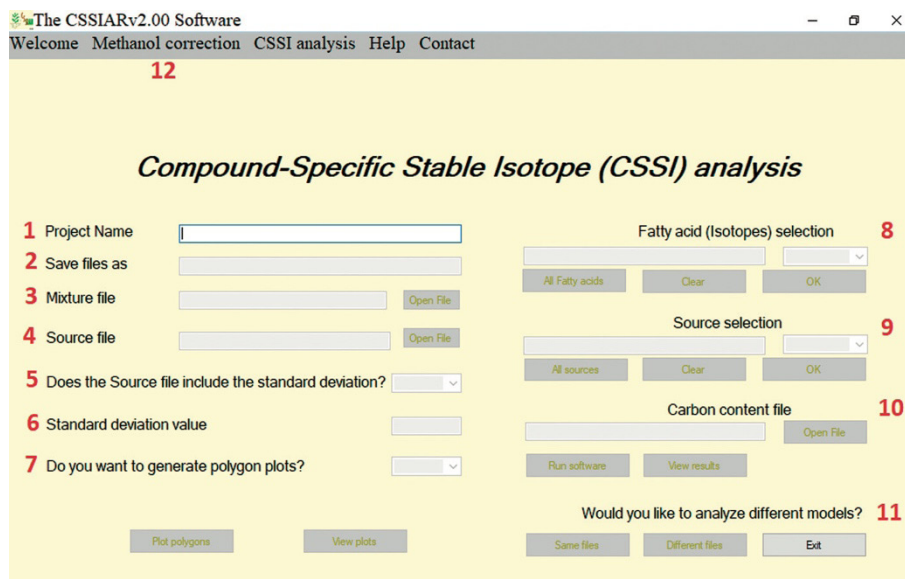


Figura 2. Pantalla de trabajo del programa CSSIAR v2.00.
 Figure 2. Work screen of the CSSIAR software v2.00.

v2.00 para estudiar un amplio número de muestras de una cuenca, en un tiempo muy reducido.

La Figura 2 muestra la pantalla principal de trabajo del programa CSSIAR v2.00. En el recuadro con el número 1 se coloca el nombre del proyecto y, en el 2 el nombre del archivo en el que se generarán con los resultados. Los recuadros 3 y 4 se utilizan para colocar los archivos de texto con los valores de CSSI de las mezclas y las fuentes, respectivamente y, si éstos incluyen la desviación estándar o no, se indica en el 5. En el espacio indicado con el 6 se coloca el valor de la desviación estándar, si no se incluyen en el archivo anterior, y en el 7 se indica si se generarán gráficos de polígono. En el número 8 se determinan los AG con los que se hará el análisis en el programa, mismo que pueden seleccionarse en combinación de 2 ó más. Las fuentes a analizar se especifican en el 9 y, en el 10, el archivo con los contenidos de carbono. En el apartado 11 se indica si se volverá a correr el programa con los mismos o diferentes archivos. Al final, la corrección por el metanol se realiza a partir de la opción que aparece con el número 12.

Algunas de las mejoras de este programa son las siguientes: 1) los paquetes requeridos para funcionar de manera correcta se instalan automáticamente; 2) el programa permite analizar los resultados de las huellas isotópicas de las fuentes y las mezclas, así como el %C y los EMAGs, mediante archivos de texto; y 3) se puede trabajar con datos faltantes (datos perdidos). Además, si las fuentes no incluyen la desviación estándar puede incluirse manualmente al usar el programa. De igual forma, es posible analizar todas las fuentes o seleccionar sólo algunas, lo mismo para los $\delta^{13}\text{C}_{\text{AG}}$ (valores isotópicos de los AG). La interacción de cada par de valores isotópicos, con las mezclas y las fuentes se representa en gráficas de sencilla interpretación visual, lo cual apoya al usuario en la identificación correcta de los datos a analizar.

En relación con los resultados, el programa CSSIAR v2.00 genera archivos de Excel. Éstos contienen: en la primera hoja, un resumen del análisis donde se especifican los archivos que se usaron como mezclas, fuentes y contenido de carbono, así como el valor que se utilizó como desviación estándar para las fuentes, el número e identidad de los isótopos y fuentes analizados en el estudio. En las cuatro hojas siguientes están los resultados de las proporciones isotópicas de las fuentes para cada mezcla, las desviaciones estándar de estas proporciones, las proporciones de suelo y sus desviaciones estándar, respectivamente.

With regard to the results, the CSSIAR v2.00 software generates Excel files. The first page of the file includes a summary of the analysis which specifies the files that were used as carbon mixtures, sources, and content, as well as the value that was used as standard deviation for the sources and the number and identity of the isotopes and sources that were analyzed in the study. The four following pages include the results of the isotope ratio of the sources for each mixture, the standard deviations for those ratios, the soil ratios and their standard deviations, respectively. Therefore, the analysis of these results serves as the basis for the identification of the main land uses that contribute to deposition of sediments in the study sites and for the decision making that generates and establishes soil conservation strategies.

Some recent applications of CSSI in Latin America and the Caribbean

The CSSI technique and its use in the identification of sediment sources is experiencing a worldwide boom. It mainly focuses on mitigating the effects of soil degradation and evaluating the effectiveness of the measures that have been applied to preserve this resource. These efforts were significantly promoted by the participation in regional projects coordinated by the International Atomic Energy Agency (IAEA) and other agencies and institutions, such as Newton Picarte CONICYT, along with the Research Councils UK. For example, since 2014, the use of this technique was spread in Latin America and the Caribbean, through a regional Latin American project sponsored by the IAEA. This project has had promising results, including the studies carried out by Bravo-Linares *et al.* (2018) who tracked sediment transport in the basins of hillside forests in Chile, using the CSSI technique, which allowed them to identify the main sources of soil erosion. They also generated promising information and pilot strategies for the improvement of the runoff characteristics of forest paths, the main erosion sources in the study site.

Torres-Astorga *et al.* (2018) proposed the integrated application of two analytical techniques [CSSI and X-ray fluorescence (XFR)] to select environmental tracers, in order to identify the main sediment sources of an agricultural basin in central Argentina which is distinguished by the erodibility of its soils.

Así, se parte del análisis de estos resultados para identificar los principales usos de suelo que contribuyen al depósito de sedimentos en los sitios de estudio, y apoyar a la toma de decisión para generar y establecer estrategias de conservación del suelo.

Algunas aplicaciones recientes de CSSI en América Latina y el Caribe

La técnica de CSSI y su aplicación en la identificación de las fuentes de sedimento tiene un auge creciente en el mundo. La cual se enfoca principalmente en la mitigación de los efectos de la degradación del suelo y la evaluación de la efectividad de las medidas de conservación de este recurso. Estos esfuerzos se impulsan de forma significativa por la participación en proyectos regionales coordinados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y otros organismos e instituciones como Newton Picarte CONICYT, junto con Research Councils UK. Por ejemplo, en América Latina y El Caribe, desde el 2014, se difundió el uso de esta técnica en un proyecto regional latinoamericano auspiciado por el OIEA, del cual se generaron resultados promisorios. Entre ellos destacan los estudios realizados por Bravo-Linares *et al.* (2018), en el cual usaron la técnica de CSSI para rastrear el transporte de sedimentos en cuencas con bosques ladera en Chile, lo cual permitió identificar las principales fuentes de erosión edáfica. Además, se generó información promisoriosa y estrategias piloto para mejorar las características de la escorrentía en los caminos forestales, principales fuentes de erosión en el sitio de estudio. Torres-Astorga *et al.* (2018) propusieron la aplicación integrada de dos técnicas analíticas [CSSI y fluorescencia de Rayos X (FRX, por sus siglas en inglés)] para seleccionar trazadores ambientales con el fin de identificar las fuentes principales de sedimentos en una cuenca agrícola en el centro de Argentina, que se caracteriza por la erosionabilidad de sus suelos.

Discusión

Para el estudio de la erosión de suelo en una gran extensión de territorio, como lo es una cuenca hidrológica, es indispensable comparar los resultados con el conocimiento de los sitios a partir de visitas a campo. Esto ayudará a comprender los procesos que ocurren en el suelo y conocer las causas de su movimiento.

Discussion

To study soil erosion in a huge territory—such as a drainage basin—the results must be compared with the knowledge of the site provided by field visits. This will help to understand the processes that take place in the soil and to find out the causes of their movement. Consequently, preventive and mitigation smallholding-level measures can be formulated which are appropriate to the activities of the different land uses. These simple, yet effective measures include: 1) keeping the soil covered with some kind of plant cover that provides support, prevent entrainment, and diminish runoff speed; 2) changing the direction of the furrows; and 3) avoiding burning crop residues. Another measure is planting natural barriers or “green enclosures” (*e.g.*, trees surrounding certain plots of land) that diminish the amount of sediment that may be displaced, thus avoiding the removal of the plant cover. Additionally, erosion prevention must be a joint effort by the various members of society (*e.g.*, farmers, experts, researchers), with the support of government authorities, through specific plans that must be followed. These joint actions will build bridges between science, land owners, and the public at large, optimizing the efficiency of the measures that are planned.

Public policies on this matter must be reviewed, updated, and above all put into practice. The necessary measures should be established and maintained and they should also be monitored and followed-up on a regular basis, in order to evaluate their effectiveness and, if necessary, to consider improvements that enable the sustainability of the activities carried out on the soil. Finally, we must emphasize the importance of developing new technologies—based on the results of scientific research—that can be applied to soil conservation.

The CSSI technique requires the support of other quantitative techniques (such as sediment loads modelling) which use weather variables, the implementation of GIS, the estimation of the accumulation rates obtained with FRN, and the additional use of ^2H , ^{18}O , ^{15}N , and other isotopes. However, as a stand-alone technique, CSSI is a powerful tool that identifies the sources (of a deposition zone) that undergo erosion processes.

Finally, the information resulting from the development of these studies must be used to

Así, se podrán formular medidas preventivas y de mitigación a nivel de parcela acordes a las actividades de los diferentes usos de suelo. Estas medidas pueden ser simples, pero efectivas, por ejemplo: 1) mantener al suelo con algún tipo de cubierta vegetal, cuya finalidad es brindar soporte, prevenir su arrastre, disminuir la velocidad de la escorrentía; 2) cambiar la dirección de los surcos; y 3) evitar la quema de los residuos de las cosechas. Otra medida es plantar barreras naturales o “cercos verdes” (*e.g.* árboles que rodean determinados terrenos) que disminuyan la cantidad de sedimento que puedan ser desplazados, y así evitar la remoción de cobertura vegetal. Además, es imprescindible que la prevención de la erosión sea un trabajo en conjunto de los diversos actores de la sociedad (*e.g.* agricultores, expertos, investigadores) con el respaldo de autoridades gubernamentales, mediante planes concretos a seguir. Estas acciones conjuntas permitirán conectar a la ciencia con los dueños de la tierra y el público general, para optimizar la eficiencia de las acciones que se planifiquen.

Las políticas públicas en la materia se deben revisar, actualizar y, sobre todo, llevar a la práctica. Se debe procurar el establecimiento y el mantenimiento de las medidas necesarias, así como su respectivo monitoreo y seguimiento periódico, para evaluar su efectividad y, de ser necesario, explorar mejoras que permitan la sostenibilidad de las actividades realizadas en el suelo. Por último, es necesario enfatizar la importancia del desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a la conservación del suelo basadas en los resultados de las investigaciones científicas.

La técnica de CSSI requiere el apoyo de otras técnicas cuantitativas, como la modelación de cargas de sedimento que utilizan variables climáticas, la implementación de SIG, las estimaciones de las tasas de acumulación obtenidas con FRN, y el uso adicional de ^2H , ^{18}O , ^{15}N , y otros isótopos. Sin embargo, por sí sola, la técnica de CSSI es una herramienta poderosa que identifica las fuentes (en una zona de deposición) que atraviesan procesos erosivos.

Finalmente, la información que se genera por el desarrollo de estos estudios debe utilizarse para el establecimiento de medidas efectivas de prevención de la pérdida de la capa arable del suelo (como ya ocurre en otros países), vital para la permanencia de las actividades agrícolas, para así evitar consecuencias mayores en los sitios a los que estos sedimentos terminan depositados.

establish effective prevention measures that stop the loss of the soil's arable layer (a phenomenon that already takes place in other countries), which is vital for the permanence of agricultural activities and to avoid major consequences at the final destinations of those sediments.

CONCLUSIONS

The CSSI technique enables the identification of soil erosion sources and deposition sites through the analysis of the isotopic signature ($\delta^{13}\text{C}$) of the long-chain fatty acids. It is not a quantitative technique; therefore, combining it with other techniques that estimate sediment loads is recommended. Knowledge about soil erosion sources provides the information necessary to take preventive measures that preserve this natural resource and mitigate the *ex situ* negative effects. In this manner, joint efforts can be made to enhance the fertility of our soils and, consequently, the ecosystem services they provide.

-----*

—End of the English version—

CONCLUSIONES

La técnica de CSSI permite identificar las fuentes de erosión del suelo y los sitios de depósito mediante el análisis de las huellas isotópicas ($\delta^{13}\text{C}$) de los AG de cadena larga. No es una técnica cuantitativa, por lo que se recomienda utilizarla en conjunto con otras que estimen las cargas de sedimento. El conocimiento de las fuentes de erosión del suelo brinda información precisa para tomar acciones preventivas de conservación de este recurso natural, y de mitigación de los efectos negativos *ex situ* y, así, unir esfuerzos para mejorar la fertilidad de nuestros suelos y con ello, los servicios ecosistémicos que proveen.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Guadalupe Lizeth Rojas Soto, por su apoyo en la revisión crítica y formato del presente manuscrito. Además, al proyecto “Making soil erosion understandable and

governable at the river basin scale for food, water and hydro-power sustainability in Latin America” auspiciado por Newton Picarte CONICYT, en conjunto con Research Councils UK, y al proyecto RLA5077 “Enhancing livelihood through improving water use efficiency associated with adaptation strategies and climate change mitigation in agriculture”, auspiciado por el Organismo Internacional de Energía Atómica.

LITERATURA CITADA

- Bautista, F., R. Cejudo-Ruiz, B. Aguilar-Reyes, y A. Gogichashvili. 2014. El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 66: 365-376.
- Bertsch, F., y C. Henríquez. 2015. 2015: El año internacional de los suelos. *Agronomía Costarricense.* 39: 150-155.
- Bouillon, S., R. M. Connolly, and D. P. Gillikin. 2011. Use of stable isotopes to understand food webs and ecosystem. *In: Wolanski, E., and D. S. McLusky (eds). Treatise on Estuarine and Coastal Science.* Waltham: Academic Press (Ed). pp: 143-173.
- Blake, W. H., K. J. Ficken, P. Taylor, M. A. Russell, and D. E. Walling. 2012. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments. *Geomorphology.* 139-140: 322-329.
- Bravo-Linares, C., P. Schuller, A. Castillo, L. Ovando-Fuentealba, E. Muñoz-Arcos, O. Alarcón, S. de los Santos-Villalobos, R. Cardoso, M. Muniz, R. dos Anjos, R. Bustamante-Ortega, and G. Dercon. 2017. First use of a compound-specific stable isotope (CSSI) technique to trace sediment transport in upland forest catchments of Chile. *Sci. Total Environ.* 618: 1114-1124.
- de los Santos-Villalobos, S., M. Ayala-Zepeda, y R. Bórquez-Holguín. 2015. Estrategia para la conservación del suelo. *CyD.* 282: 26-31.
- de los Santos-Villalobos, S., C. Bravo-Linares, R. Meigikos-dos Anjos, R. Cardoso, M. Gibbs, A. Swales, L. Mabit, and G. Dercon. 2017. The CSSIAR v1.00 software: A new tool based on SIAR to assess soil redistribution using compound specific stable isotopes. *SoftwareX.* 6: 13-18.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) e Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). 2015. Global soil status, processes and trends. *In: L. Montanarella, V. Chude, K. Yagi, P. Krasilnikov, S. K. A. Panah, M. L. Mendonça-Santos, D. Pennock and N. McKenzie (eds). Status of the World's Soil Resources - Main Report.* Roma, Italia, 2015. pp: 100-169.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2019. FAO soils portal. Soil Biodiversity. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-biodiversity/en/> (Consulta: junio 2019)
- Gibbs, M. 2008. Identifying source soils in contemporary estuarine sediments: A new compound-specific isotope method. *Estuar. Coast.* 31: 344-359.
- Gibbs, M. 2014. Protocols on the use of the CSSI Technique to identify and apportion soil sources from land use. National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA). <http://www.naweb.iaea.org/nafa/swmn/public/CSSI-technique-protocols-revised-2013.pdf> (Consulta: noviembre 2018).
- Gibbs, M., G. Olsen, and M. Stuart. 2015. New River Estuary sediment sources tracking pilot study. National Institute of Water & Atmospheric Research (NIWA). <http://www.es.govt.nz/Document%20Library/Research%20and%20reports/Estuarine%20reports/New%20River%20Estuary%20sediment%20tracking%20pilot%20study.pdf> (Consulta: noviembre 2018).
- Hsieh, Y. P., K. T. Grant, and G. C. Bugna. 2009. A field method for soil erosion measurements in agricultural lands. *J. Soil Water Conserv.* 64: 374-382.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 2015. Un terreno estable: técnicas nucleares para frenar la erosión del suelo en Viet Nam. *In: Miklos, G. (ed). Átomos para la Paz y el Desarrollo.* Edición especial del Boletín del OIEA sobre los usos pacíficos de la tecnología nuclear. Marzo, 2015. pp: 14-15.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2014. Sistema de Información Geográfica. <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf> (Consulta: junio 2019).
- Kendall, C., and E. A. Caldwell. 2012. Fundamentals of isotope geochemistry. *In: Kendall, C. and J. J. McDonnell (eds). Isotope Tracers in Catchment Hydrology.* Países Bajos, 2012. Elsevier (Ed). pp: 51-84.
- Lewin, W., and W. Goldstein. 2011. From the nucleus to deep space. *In: Loose, E. (ed). For the Love of Physics: From the End of the Rainbow to the Edge of Time - A Journey Through the Wonders of Physics.* New York, United States of America, 2011. Free Press (Ed). pp: 1-20.
- Mabit, L., F. Zapata, G. Dercon, M. Benmansour, C. Bernard, and D. E. Walling. 2014. Assessment of soil erosion and sedimentation: the role of fallout radionuclides. *In: Guidelines for using fallout radionuclides to assess erosion and effectiveness of soil conservation strategies.* IAEA-TECDOC-1741. Viena, Austria, Junio, 2014. International Atomic Energy Agency. pp: 3-26.
- McCorkle, E. P., A. A. Berhe, C. T. Hunsaker, D. W. Johnson, K. J. McFarlane, M. L. Fogel, and S. C. Hart. 2016. Tracing the source of soil organic matter eroded from temperate forest catchments using carbon and nitrogen isotopes. *Chem. Geol.* 445: 172-184.
- Morgan, R. P. C. 2005. *Soil Erosion and Conservation.* 3a. ed. Blackwell Publishing (Ed). Reino Unido. pp: 1-10.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2019. Stable and radiocarbon isotopes of carbon dioxide. The technical details: determining delta values. Earth System Research Laboratory (ESRL). Global Monitoring Division <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/education/isotopes/deltavalues.html> (Consulta: junio 2019).
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2019. Población. Asuntos que nos importan. <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html> (Consulta: junio 2019).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2015. Suelos y biodiversidad. Roma, Italia. <http://www.fao.org/3/a-i4551s.pdf> (Consulta: junio 2019).
- Parnell, A. C., R. Inger, S. Bearhop, and A. Jackson. 2010. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too much variation. *PLoS One.* 5: e9672.
- Pérez-Martínez, I., y F. M. Romero. 2015. Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos

- por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 67: 01-12.
- Phillips, D. L., y J. W. Gregg. 2003. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Springer-Verlag. Oecologia.* 136: 261-269.
- Raven, J. A. 2002. Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems. *In: Unkovich, M., J. Pate, A. McNeill, and D. J. Gibbs (eds). Annals of Botany.* Dordrecht, Países Bajos, 2001. Kluwer Academic Publishers (Ed). pp: 499-500.
- Reiffarth, D., E. Petticrew, P. Owens, and D. Lobb. 2016. Sources of variability in fatty acid (FA) biomarkers in the application of compound-specific stable isotopes (CSSIs) to soil and sediment fingerprinting and tracer: A review. *Sci Total Environ.* 565: 8-27.
- Rhoton, F. E., W. E. Emmerich, D. A. DiCarlo, D. S. McChesney, M. A. Neaig, and J. C. Ritchie. 2008. Identification of suspended sediment sources using soil characteristics in a semiarid watershed. *Soil Sci Soc Am J.* 72: 1102-1112.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2012. Consulta temática. Suelos. Glosario. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_GLOS_SUELO&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce (Consulta: noviembre 2018).
- Sharp, Z. D. 2017. Principles of Stable Isotope Geochemistry. 2a. Ed. Pearson (Ed). Upper Saddle River, New Jersey, United States of America. pp: 1-6.
- Soil Science Society of America (SSSA). 2018. Glossary of soil science terms. <https://www.soils.org/publications/soils-glossary/#> (Consulta: junio 2019).
- Torres-Astorga, R., S. de los Santos-Villalobos, H. Velasco, O. Domínguez-Quintero, R. Cardoso, R. Meigikos dos Anjos, Y. Diawara, G. Dercon, and L. Mabit. 2018. Exploring innovative techniques for identifying geochemical elements as fingerprints of sediment sources in an agricultural catchment of Argentina affected by soil erosion. *Environ. Sci. Pollut. R.* 25: 20868-20879.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2016. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) - Welcome to RUSLE 1 and RUSLE 2. Agricultural Research Service. <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentationlaboratory/watershed-physical-processes-research/docs/revised-universal-soil-loss-equation-rusle-welcome-to-rusle-1-and-rusle-2/> (Consulta: junio 2019).