



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, HIDROGEOQUÍMICA E INTERACCIÓN AGUA-ROCA DEL HUMEDAL DE LA LAGUNA DEL TRANCO DE HORROS, PROVINCIA DE JAÉN, ESPAÑA

Alumno/a: Orocio Alcantara, Nahum Elias

Tutora: Dra. Jiménez Espinosa, Rosario

Dpto: Departamento de Geología

Tutor: Dr. Jiménez Millán, Juan

Dpto: Departamento de Geología

Octubre, 2022



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

**Máster Universitario en Análisis, Conservación y Restauración de
Componentes Físicos y Bióticos de los Hábitats**

Trabajo Fin de Máster

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA,
HIDROGEOQUÍMICA E INTERACCIÓN AGUA-
ROCA DEL HUMEDAL DE LA LAGUNA DEL
TRANCO DE HORNO, PROVINCIA DE JAÉN,
ESPAÑA**

Fdo.: _____

Orocio Alcantara, Nahum Elias

Fdo.: _____

Jiménez Espinosa, Rosario

Jiménez Millán, Juan

Jaén, octubre, 2022

Resumen

Los humedales son hábitats de gran valor ambiental a nivel local, regional e internacional. Su importancia radica en la gama amplia de servicios ecosistémicos que brinda a la humanidad y los problemas vinculados con su gestión y manejo. En España, estos hábitats han sido estudiados desde diferentes disciplinas a partir de la segunda mitad del siglo pasado, sin embargo, aún existen humedales sin caracterizar y, dado que no se puede cuidar lo que no se conoce, es preciso abordar el estudio de la mayor cantidad de ellos. Uno de estos hábitats es el humedal de la Laguna del Tranco en Hornos, en la provincia de Jaén, que por sus particulares propiedades químicas, físicas y bióticas resulta atractivo para su análisis.

El presente estudio propone abordar la caracterización del agua de la Laguna del Tranco, los sedimentos de esta, así como las interacciones agua-roca del humedal desde un marco físico, químico e hidrogeológico, el cual proporciona un enfoque útil para comprender la composición de las aguas y las dinámicas de transporte y transformación de los sedimentos. Para llevar a cabo esta caracterización se realizaron medidas *in situ* de parámetros fisicoquímicos del agua, se plantea el uso de técnicas de cromatografía iónica, espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente y determinación de isótopos estables para las aguas. En el caso de los sedimentos se usaron técnicas de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, para realizar la caracterización de los minerales y las interacciones agua-roca del humedal. Los resultados permitieron identificar las facies químicas del agua, su composición y origen; la composición y estructura mineral de los sedimentos, las variables, procesos y ciclos biogeoquímicos que controlan sus transformaciones.

Abstrac

Wetlands are habitats of great environmental value at the local, regional and international levels. Its importance lies in the wide range of ecosystem services it provides to humanity and the problems related to its management and management. In Spain, these habitats have been studied from different disciplines since the second half of the last century, however, there are still uncharacterized wetlands and, given that what is unknown cannot be cared for, it is necessary to approach the study of the more of them. One of these habitats is the Laguna del Tranco wetland in Hornos, in the province of Jaén, which, due to its chemical, physical and biotic properties, is attractive for analysis.

The present study proposes to approach the characterization of the water of Laguna del Tranco, its sediments, as well as the water-rock interactions of the wetland from a physical, chemical, and hydrogeological framework, which provides a useful approach to understand the composition of the waters and the dynamics of transport and transformation of sediments. To carry out this characterization, in situ measurements of physicochemical parameters of the water were carried out, the use of ion chromatography techniques, inductively coupled plasma mass spectrometry and determination of stable isotopes for water is proposed. In the case of the sediments, X-ray diffraction and scanning electron microscopy techniques were used to characterize the minerals and the water-rock interactions of the wetland. The results allowed to identify the chemical facies of the water, its composition and origin; the composition and mineral structure of the sediments, the variables, processes, and biogeochemical cycles that control their transformations.

ÍNDICE

1. Introducción.....	9
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. Caracterización geográfica, geológica e hidrogeológica del humedal.....	14
4. Materiales y métodos	19
4.1 Trabajo de campo	19
4.1.1 Establecimiento de puntos de muestreo	19
4.2 Trabajo de laboratorio	22
4.2.1 Determinación hidrogeoquímica e isotópica de las aguas	22
4.2.2 Determinación mineralógica de los sedimentos del humedal.....	25
4.3 Trabajo de gabinete	29
4.3.1 Análisis de datos de agua.....	29
4.3.2 Interpretación de difractogramas	30
4.3.3 Procesamiento y visualización de imágenes de MEB	30
5. Resultados y discusión.....	31
5.1 Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las aguas del humedal	31
5.1.1 Caracterización de metales y elementos minoritarios	31
5.1.2 Caracterización de aniones y cationes	33
5.1.3 Índices de saturación de las principales fases minerales.....	35
5.1.4 Caracterización isotópica.....	36
5.2 Caracterización mineralógica de los sedimentos del humedal	38
5.2.1 Caracterización mineralógica de los sedimentos con DRX.....	41
5.2.2 Caracterización de los sedimentos con MEB	48
5.3 Identificación de las variables y ciclos biogeoquímicos que controlan las transformaciones minerales en el humedal	51

6. Conclusiones.....	57
7. Referencias	60
8. Fuentes de financiación.....	75
9. Breve resumen de las asignaturas de máster realizadas.....	75
10. Currículum vitae del autor.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros analizados y equipos utilizados en este estudio.	21
Tabla 2. Disoluciones utilizadas para la determinación de aniones y cationes.	23
Tabla 3. Análisis fisicoquímico de las aguas del humedal (febrero 2022). [T= °C; C.E. = μ S/cm; *= mg/L; otros = μ g/L].	31
Tabla 4. Principales características de la asociación mineralógica predominante en el Humedal la Laguna del Tranco.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica y cuencas hidrográficas de influencia en el área de estudio..	15
Figura 2. Esquema de los acuíferos de influencia en el área de estudio.	16
Figura 3. Localización geográfica y esquema de unidades litológicas de influencia para el área de estudio	18
Figura 4. Localización de los puntos de muestreo de agua y sedimento en el humedal Laguna del Tranco.....	21
Figura 5. Facies químicas del agua en La Laguna del Tranco basado en los diagramas de Piper (1944) y Kelly (2005)	34
Figura 6. Índices de saturación de las principales fases minerales solidas en las aguas del humedal La Laguna del Tranco	36
Figura 7. Comparación de los valores isotópicos de las dos surgencias del manantial asociado al Humedal La Laguna del Tranco con la Línea Mundial de las Aguas Meteóricas, la Línea de las aguas Meteóricas del Mediterráneo Occidental y la Línea de las aguas Meteóricas del Atlántico	37

Figura 8. Relación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰)VSMOW y la altitud de del colector de lluvia del vertiente occidental.	37
Figura 9. Difractogramas correspondientes a los testigos de sedimento colectados en el sitio LTN del Humedal La Laguna del Tranco.....	43
Figura 10. Difractogramas correspondientes a los testigos de sedimento colectados en el sitio LTS del Humedal La Laguna del Tranco	45
Figura 11. Difractogramas correspondientes a los testigos de sedimento colectados en el sitio LTC del Humedal La Laguna del Tranco.	47
Figura 12. Difractogramas correspondientes a los testigos de sedimento colectados en el sitio LTD del Humedal La Laguna del Tranco	47
Figura 13. Fotomicrografías de MEB de tres muestras de sedimento superficial del Humedal La Laguna del Tranco	49
Figura 14. Fotomicrografías de MEB de dos muestras de sedimento superficial del Humedal La Laguna del Tranco	51
Figura 15. Visión general de los ciclos y procesos que ocurren sobre la fase geológica superficial de la tierra y que controlan las transformaciones minerales en el Humedal La Laguna del Tranco.	55
Figura 16. Diagrama esquemático de las trasformaciones minerales para formar pirita y yeso....	56

1. Introducción

A nivel mundial, los recursos hídricos son un bien vital y estratégico para el desarrollo socioeconómico de las poblaciones humanas. Desde finales del siglo XX y principios del XXI la agenda ambiental internacional ha enfatizado en la necesidad de conocer y gestionar los recursos hídricos del planeta, tomando como eje rector, un enfoque de sostenibilidad. De manera que las referencias a la sostenibilidad hídrica han venido a constituir un espacio común en todo tipo de foros y ámbitos formales e informales.

Esta agenda ambiental internacional, ha permeado en el marco normativo sobre política europea del agua, dando lugar a la creación de una Directiva Marco del Agua (DMA), que, entre otros aspectos, destaca la necesidad urgente de procedimientos de seguimiento y control, en donde la gestión de las aguas superficiales y subterráneas es el objetivo común (Martín, 2011; Sotelo y Sotelo, 2014). La Agencia Europea de Medio Ambiente (2009) indica que la gestión sostenible del agua requiere de inventarios de los recursos con los que cuenta un territorio, ya que no se puede gestionar lo que no se conoce. Además, esta gestión debe contar con un sistema integral de mediciones que permitan evaluar los cambios experimentados bajo la influencia antrópica y/o de los factores naturales (Perevochtchikova, 2009; Suárez et al., 2010).

Algunos autores como Gao et al. (2020), Cantú et al. (2021) y Liu et al. (2021) sugieren que los estudios hidrogeoquímicos han demostrado ser una herramienta relevante y eficaz para caracterizar cuerpos de agua, ya que contribuyen a la determinación, análisis e identificación de los posibles factores que controlan sus composiciones químicas. De hecho, Pu et al. (2015) y Cardona et al. (2018) señalan que este tipo de estudios contribuyen al conocimiento del comportamiento hidrogeoquímico local y regional, ofreciendo información acerca de los procesos de recarga, tránsito y descarga de las aguas que contribuyen a la preservación y gestión sostenible de estos recursos. En los últimos años, la relevancia de estos aspectos se ha reflejado en numerosas publicaciones de diversa índole cuyos objetivos convergen hacia la caracterización hidrogeoquímica de las aguas, sean estas superficiales (Murdoch, et al., 2000; Ouyang, 2005; Zhang et al., 2012; Amić y Tadić, 2018; Missi y Atekwana, 2020; Olubanjo y Adeleke, 2020); y/o subterráneas (Prommer y Stuyfzand, 2005; Parihar et al., 2012; Omofonmwan y Esegbe, 2017; Stradioto et al., 2020; Gao et al., 2021; Radafard et al., 2021; Nouayti et al., 2022).

Además de los estudios hidrogeoquímicos, la literatura científica enfatiza como un elemento clave para el entendimiento y estudio de los cuerpos de agua, la caracterización de sus sedimentos que configuran los acuíferos, de manera que la identificación de la procedencia de los minerales

que son transportados y/o transformados en él, proporciona información sobre la dinámica del hábitat relacionado (Frink, 1969; Kravitz, 1976; Pettersson et al., 1988; Bianchini et al., 2002; Last, 2002; Alshemmari et al., 2013; Avramidis et al., 2013). Aunque, esta transformación y transporte de minerales ocurre preferentemente en la superficie del terreno por efecto de la meteorización por acción química del agua, los efectos de las interacciones agua-roca proporcionan información sobre el debilitamiento hidrolítico de diversos minerales, por lo que su estudio no debe ser pasado por alto (Ellis y Mahon, 1964; Lasaga, 1984; Grasvy et al., 2000; Saxena y Ahmed, 2001).

El estudio de la hidrogeología de las aguas subterráneas y superficiales en España cuenta con una historia amplia que abarca desde principios de 1900 hasta la segunda década de los 2000. Esta historia tiene registro en diversas publicaciones que han sido compiladas y/o publicadas por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), entre las que destacan IGME y EPTISA (1985), Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) (2000), Baeza et al. (2001), Ministerio de Medio Ambiente (2007) y López y Fornés (2013). A nivel regional (Andalucía), encontramos los estudios del ITGE et al. (1998) y López et al. (2008); en tanto que para la provincia de Jaén se pueden señalar los trabajos de Baeza et al. (2003), González et al. (2006), Rubio et al. (2007) y Rubio et al. (2011). Por su parte, entre los estudios que caracterizan la mineralogía de los sedimentos se encuentran los trabajos de Irabien y Velasco (1990), Requena, et al. (1991), Rubio et al. (1996), Alcántara et al. (2000), Bastida et al. (2010) y Fernández et al. (2016).

De manera particular, uno de los recursos hídricos asociados a sistemas acuáticos críticos y de relevancia mundial, son los humedales. Estos hábitats, son los únicos a nivel mundial que cuentan con una convención internacional para su conservación (RAMSAR Convention), misma que ha sido adoptada desde principios de la década de 1970. En términos muy generales, un humedal ocurre donde el nivel freático está cerca de la superficie de la tierra o donde la tierra está cubierta de agua y puede ocupar varios metros de profundidad, sin que esta supere los 6 metros (Ramsar Convention on Wetlands, 2018). Desde un punto de vista antropocéntrico, su importancia radica en la gama amplia de servicios ecosistémicos que brinda a las poblaciones humanas, entre los que se encuentran el almacenamiento y retención de agua; fuente y sumidero de gases de efecto invernadero; retención, recuperación y eliminación de exceso de nutrientes y otros contaminantes; paisaje atractivo y valores estéticos y culturales, por mencionar algunos (Díaz et al., 2018).

El abordaje de estos hábitats se ha desarrollado desde diversos enfoques, entre los que destacan los estudios de sus recursos bióticos (e.g. Sartori et al., 2015; Preis et al., 2018; Talukdar et al., 2022; Barik et al., 2022; Zheng et al., 2022); abióticos (e.g. Wang et al., 2018; Bao et al., 2022;

Ba et al., 2022); prácticas de manejo (e.g. Chen y Liu, 2015; Li. y Shuqiang, 2018; Liu et al., 2022; Sucholas et al., 2022); y el impacto de las políticas públicas (e.g. Dugan, 1992; Matamanda et al., 2018; Ramsar Convention Secretariat, 2018; Taylor y Druckenmiller, 2022). No obstante, los aspectos sobre sus procesos de recarga, tránsito, descarga de las aguas, origen y evolución de los minerales que se transportan y transforman en estos hábitats, han sido de menor alcance, destacando los trabajos de Camur et al. (1997), Gascoyne, M. (2004), Cusimano et al. (2006), Manno et al. (2007), Ensign et al. (2015), Cao et al. (2016) y Guo et al. (2019). Es preciso destacar que a pesar de la diversidad de abordajes que existen, la gran mayoría de ellos confluye en un principio básico, la conservación, siguiendo sus patrones y fluctuaciones naturales y/o antrópicas.

Específicamente, en España, los humedales de interior son especialmente pequeños, con dependencia frecuentemente de las aguas subterráneas; sometidos a presiones como desecación y drenaje, alteración en sus regímenes hídricos, alteraciones morfológicas, eutroficación, falta de coordinación para su gestión y de entendimiento para su planificación hidrológica (Camacho, 2008). De acuerdo con Bernués (2011), en España, este tipo de ambientes ha perdido al menos el 60% de la superficie original, aunque, sugiere que esta cifra debe ser tomada con cautela, ya que existen grandes diferencias en cómo se interpreta la definición de humedal, puesto que cada región y ambiente es realmente particular. Al igual que en otras regiones de la península, los humedales de Andalucía se han visto fuertemente reducidos por la agricultura; aunque, es la Comunidad Autónoma con más humedales incluidos en la Lista Ramsar (25) y la que mayor número de humedales tiene incluidos en el inventario nacional (117) (Arias y Gómez, 2015).

En relación con la provincia de Jaén, cabe señalar que la parte central y oriental de la misma, forma parte del Valle del Guadalquivir que destaca por la gran cantidad de humedales inventariados (Manzano et al., 2002). Hasta 2003, Jaén, contaba con un total de 90 humedales listados (sin incluir Laguna del Tranco); aproximadamente un 45% de ellos está asociado a arcillas y un 19% a calizas, que coinciden con las zonas de montaña (Ortega et al. 2003). Entre los principales problemas de los humedales de esta zona sobresalen los drenajes para utilizar sus suelos como espacios de cultivos, en donde el olivar es el que mayor transformación ha realizado (Ortega et al., 2006).

La literatura científica referente a humedales en Jaén, se han centrado principalmente en aspectos de descripción y análisis de los componentes bióticos del hábitat (Sánchez et al., 1992; Sánchez, 2004; Ortega et al., 2007); estudios hidrogeológicos (Rodríguez et al., 2009; Andreo et al. 2016; Gil, et al., 2017); caracterización de contaminantes (Robles et al., 2014) y aspectos

culturales (Rueda, et al., 2021a; Rueda et al., 2021b). Otra serie de estudios realizados en torno a estos hábitats, se han centrado en aspectos de caracterización mineral, interacciones agua-roca e hidrogeología, sobresaliendo los trabajos de tesis de Moral (2005), Hernández (2016), Gil (2018), Lope (2018) y Tarazona (2019). A estos trabajos se suman aquellos que en donde las agendas de investigación son más amplias pero, en donde se caracterizan acuíferos o manantiales que abastecen humedales (Lorite y Jiménez, 2008; Lorite et al., 2008; Jiménez y Jiménez, 2010; Gil et al., 2016; Lope et al., 2018; Lope et al., 2019). Todos estos trabajos, en mayor o menor medida hacen énfasis en la necesidad de entender los aspectos hidrogeológicos del agua superficial y subterránea que abastecen a los humedales, así como, el origen y evolución de minerales que son transportados o transformados en su seno; destacando estos aspectos como necesarios para la gestión sostenible de estos hábitats.

El humedal Laguna del Tranco se localiza en Hornos, NE de la provincia de Jaén (sur de España) y forma parte de un conjunto de lagunas y humedales que se extienden por el Alto Guadalquivir. Este humedal no aparece inventariado en los catálogos oficiales de España, aunque, si se tiene constancia de su registro en el catálogo participativo y online “Conoce tus Fuentes” de manantiales y fuentes de Andalucía (www.conocetusfuentes.com). La Laguna del Tranco se ubica sobre los límites de los acuíferos de la Sierra de Cazorla y Las Sierras de Quesada-Castril. Desde el punto de vista geológico, el humedal se localiza sobre materiales sedimentarios carbonatados marinos, de edad Jurásico y Triásico. Aparece sobre unidades litológicas dominadas por conglomerados, areniscas, calizas, yesos y arcillas, principalmente.

Los aportes hídricos de este humedal proviene fundamentalmente de uno o varios manantiales termales y, de las precipitaciones directas sobre el mismo. Es un humedal permanente que puede cubrirse de manera temporal por las aguas del Embalse del Tranco. Su profundidad máxima oscila entre 2.5-3 m; cuenta con un diámetro de 50 m aproximadamente; se ubica a 641 msnm. Respecto de la vegetación dominante en el sitio, destacan *Pinus pinaster* y *Typha* spp.

Cerca del humedal afloran dos puntos de agua que corresponden a aguas termales. A unos metros en dirección norte se ubican unas ruinas de un edificio abandonado que formaban parte de lo que eran unas termas romanas, conocidas como “Baños de La Laguna” (Mударra, 2018). De acuerdo con López (2011), en estos balnearios romanos se tomaban baños curativos con las aguas del lugar, que muy probablemente eran canalizadas desde La Laguna del Tranco. La confluencia de todos los factores antes mencionados, hacen de este humedal un sitio óptimo para su estudio, ya que su relevancia no solo radica en aspectos físicos y bióticos, sino que también, en culturales. Por tanto, caracterizar los minerales y las interacciones agua-roca de este humedal

asociado a las aguas de manantial, puede aportar información valiosa para entender las dinámicas de este hábitat y que podrían ser vitales para la toma de decisiones y gestión de este y otros cuerpos de agua en la zona.

El presente estudio propone abordar la caracterización del agua de la Laguna del Tranco, los sedimentos de esta, así como las interacciones agua-roca del humedal desde un marco físico, químico e hidrogeológico, el cual proporciona un enfoque útil para comprender la composición de las aguas y las dinámicas de transporte y transformación de los sedimentos. Así mismo, plantea el uso de técnicas de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, cromatografía iónica, isótopos estables, medidas *in situ* de parámetros fisicoquímicos del agua, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, como posibilidad metodológica en la caracterización de los minerales y las interacciones agua-roca del humedal.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Caracterización hidrogeoquímica de las aguas y mineralógica de los sedimentos de la Laguna del Tranco de Hornos en Jaén, e identificación de las interacciones agua-roca en dicho humedal.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar geográfica, geológica e hidrogeológicamente el humedal
- Establecer puntos de muestreo y coleccionar muestras de agua y sedimento del humedal
- Caracterizar hidrogeoquímica e isotópicamente las aguas del humedal
- Determinar la mineralogía de los sedimentos del humedal
- Identificar las variables y ciclos biogeoquímicos que controlan las transformaciones minerales en el humedal

3. Caracterización geográfica, geológica e hidrogeológica del humedal

El Humedal la Laguna del Tranco se ubica al noreste de la provincia de Jaén (España); al suroeste del municipio de Hornos (Fig. 1) y se accede por la pista que bordea la orilla sureste del Embalse del Tranco, por la zona de “El Carrascal” y “Fuentelahiguera”. La Laguna del Tranco se encuentra dentro del Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas. El área se caracteriza por relieves fuertemente abruptos con cotas máximas que van de los 1500 a 2000 m, formadas por las sierras de Quesada, Cazorla y las Villas (ITGE, 1997).

Principalmente, el área se localiza en la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir (Fig. 1), aunque, desde el punto de vista hidrológico se relaciona con los acuíferos de La Sierra de Cazorla y Las Sierras de Quesada-Castril (Fig. 2); este último, ubicado también en la Cuenca Hidrográfica del Segura. De acuerdo con el Estudio de Sostenibilidad Hornos de Segura de la Agenda 21 (Diputación de Jaén, 2022), el acuífero de Cazorla es de carácter dolomítico y calizo de edad Lías-Dogger, donde la descarga se realiza en régimen natural por numerosos manantiales. En tanto que, los acuíferos Quesada-Castril se caracterizan por grandes pliegues paralelos al norte y estructuras de pliegue-falla al sur, donde los acuíferos son cretácicos y terciarios “colgados” en los principales relieves, coincidentes con núcleos sinclinales.

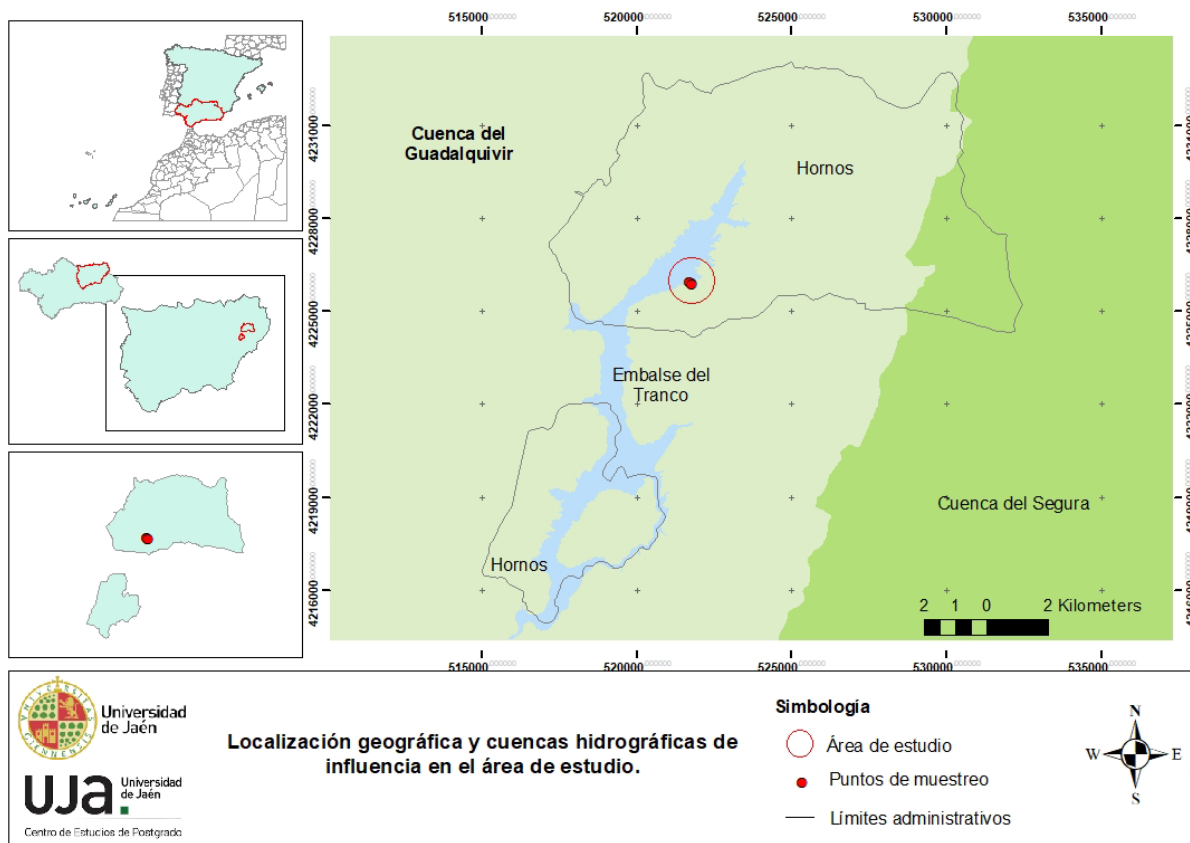


Figura 1. Localización geográfica y cuencas hidrográficas de influencia en el área de estudio. Fuente: elaboración propia con base en el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (2022).

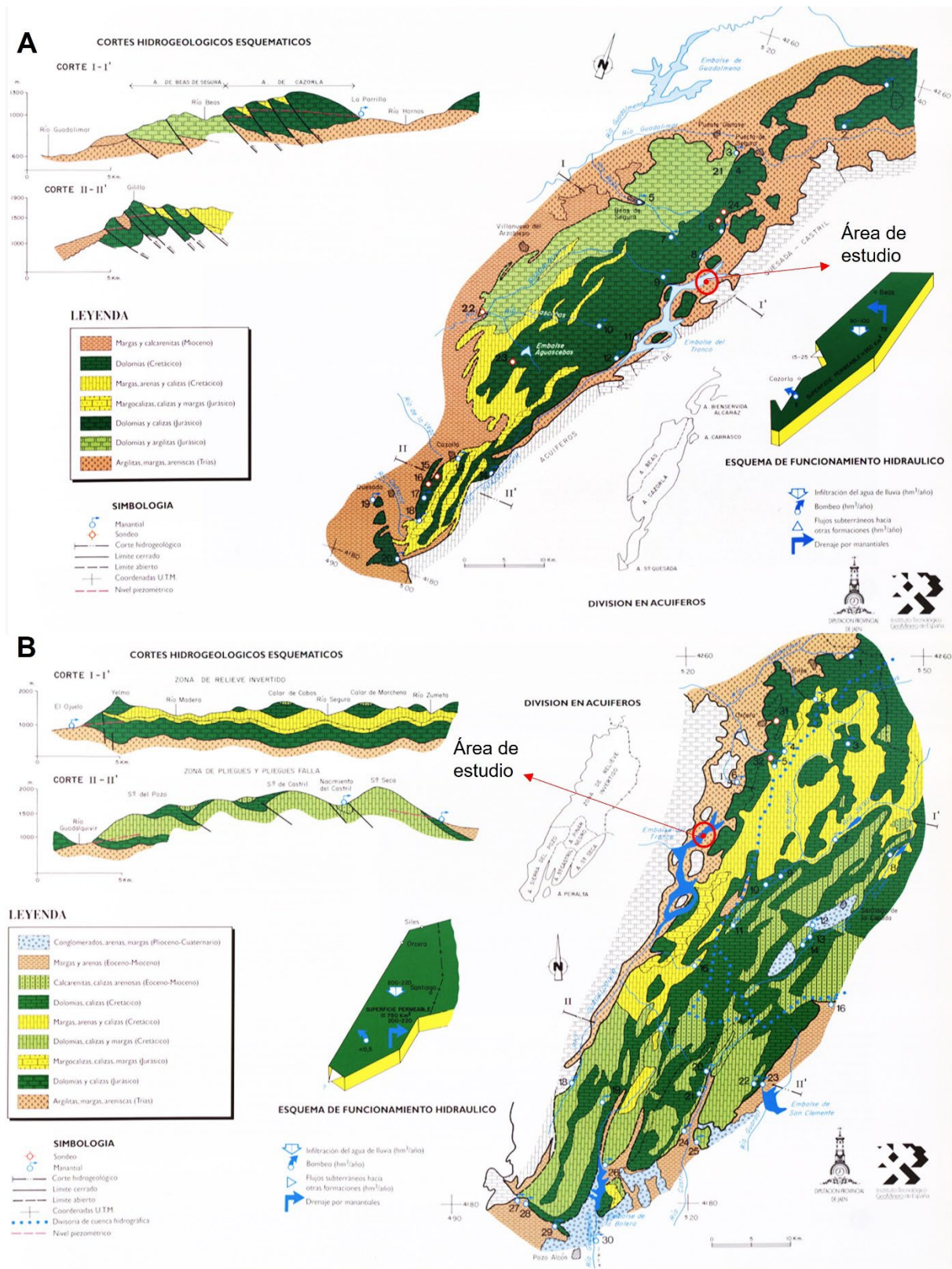


Figura 2. Esquema de los acuíferos de influencia en el área de estudio. Los número sobre el esquema corresponden a puntos de agua. Fuente: modificado de ITGE (1997).

El humedal Laguna del Tranco se encuentra sobre las Sierras Subbéticas, en donde dominan depresiones orogénicas, constituidas fundamentalmente por materiales sedimentarios marinos fuertemente deformados en época alpina. En la región afloran casi exclusivamente materiales carbonatados de edad Jurásico y Triásico. De acuerdo con el ITGE (1998), la sucesión estratigráfica descansa sobre arcillas y margas triásicas de la Formación Hornos-Siles y está constituida, de muro a techo, por los siguientes términos: un tramo dolomítico-calizo del Lías-Dogger (180-400 m); un paquete de calizas nodulosas oxforídienses (15-20 m) y, finalmente, un conjunto de calizas, margocalizas y margas del Kimmeridgiense inferior, de hasta 100 m de espesor.

Existen también, escasos afloramientos del Cretácico que corresponden a dolomías pardas del Vraconiense-Cenomanienese, que alcanzan una potencia máxima de 30 metros (ITGE, 1998). Respecto a las unidades litológicas dominan los conglomerados, areniscas, calizas, yesos y arcillas, aunque también se pueden encontrar lulitas, margas y dolomías, principalmente (Fig. 3). Por último, hay que señalar que la sierra sobre la que se encuentra este humedal presenta una estructura de fallas inversas (escamas), de dirección NNE-SSO y vergencia hacia el oeste.

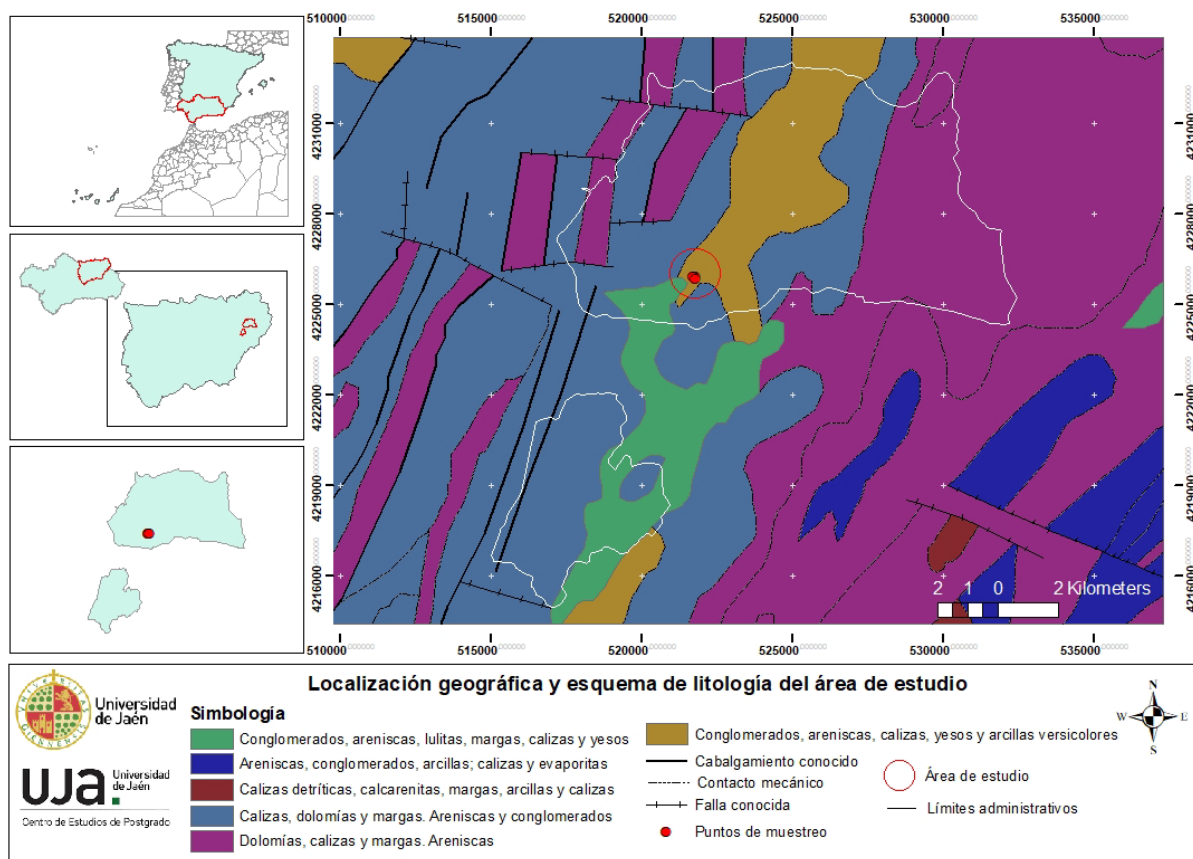


Figura 3. Localización geográfica y esquema de unidades litológicas de influencia para el área de estudio. Fuente: elaboración propia con base en el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (2022).

En relación con su climatología, el área de estudio cuenta, en general, con nevadas invernales y veranos cortos, frescos y secos. Las precipitaciones se caracterizan por la irregularidad de su distribución espacial y temporal (IGME y EPTISA, 1985), con precipitaciones medias que van entre los 900 y 1500 mm/año. Mientras que la temperatura media anual suele estar entre los 14 °C.

4. Materiales y métodos

Para el desarrollo de este trabajo se establecieron tres fases dinámicas. Primero, el trabajo de campo, que incluyó el establecimiento de puntos de muestreo y la colecta de muestras de agua y sedimento del humedal y su área de influencia. Después, se realizó el trabajo de laboratorio que consistió en dos partes; por un lado, los análisis de elementos mayoritarios, trazas e isótopos estables de las muestras de agua del humedal colectadas; por otro, se determinó la mineralogía de los sedimentos del humedal. Por último, se procesaron los datos y se procedió a su análisis, donde se identificaron las variables y los ciclos biogeoquímicos que controlan las transformaciones minerales en el humedal y su área de influencia. A continuación se describe cada una de estas fases.

4.1 Trabajo de campo

Para la colecta de muestras de agua y sedimento se realizó una salida de campo el día 9 de febrero de 2022. Para ello se utilizaron los medios técnicos y equipos del Departamento de Geología de la Universidad de Jaén y del Grupo de Investigación RNM-325.

4.1.1 Establecimiento de puntos de muestreo

Para el establecimiento de los puntos de muestreo tanto de agua como de sedimento, se realizó una revisión bibliográfica de los trabajos publicados y desarrollados en el área de estudio y, posteriormente, se identificaron los aspectos geográficos, geológicos e hidrogeológicos del humedal. Se tuvo en cuenta parámetros fisicoquímicos como la temperatura, conductividad y otros de relevancia (tabla 1). Así como, la configuración geológica y estructural del área de estudio, considerando que el humedal tiene un radio de 24.82 m y un área aproximada de 1 935 m² (Fig. 4).

4.1.1.1 Muestras de agua.

Cinco muestras de agua superficial fueron colectadas de tres puntos diferentes del área de estudio. Uno de los puntos de muestreo corresponde a agua del humedal (LT1); dos más, a surgencias de agua cercanas al humedal. La primera de ellas (LT2) se ubica a 92 m desde el punto más central del humedal en dirección NO; mientras que la segunda (LT3), se ubica a 27 m en dirección NE (Fig. 4).

Tres de las muestras de agua recogidas fueron utilizadas para determinar aniones, cationes y dos más para isótopos estables; estas, se colectaron de manera directa en frascos de polipropileno estéril de 150 mL, mismos que fueron etiquetados y conservados en frío para su posterior determinación. Además, se midieron *in situ* una serie de parámetros fisicoquímicos (tabla 1). Adicionalmente, para la determinación de metales y elementos minoritarios se tomaron tres muestras de agua de los mismos puntos que las anteriores. Estas muestras fueron colectadas en viales Eppendorf estériles con tapón hermético de 50 mL. Las muestras se acidificaron con HNO_3^- hasta alcanzar un $\text{pH} < 2$ para evitar su precipitación e intercambio iónico (Appelo y Postma, 2005).

Todas las muestras fueron transportadas al Laboratorio del Departamento de Geología de la Universidad de Jaén en una nevera a temperatura de 4°C aproximadamente. En el laboratorio las muestras conservaron en un frigorífico de temperatura constante de 4 °C sin superar las 48 h hasta su análisis.

4.1.1.2 Muestras de sedimento.

En relación con las muestras de sedimento, se tomaron un total de cuatro; tres correspondientes al humedal (LTC; LTN; y LTS); y una más que coincide con el mismo punto donde se obtuvo la muestra de agua LT3 (LTD). Para su recolección se utilizaron tubos de PVC de tamaño variable según la profundidad y accesibilidad del humedal. Los tubos fueron insertados en el sedimento a profundidades entre 15 y 35 cm, para ello se utilizó un mazo con el que se golpeó el tubo de PVC, hasta alcanzar la profundidad deseada.

Posteriormente, los tubos fueron retirados cubriendo uno de los extremos con la palma de las manos para hacer un efecto de vacío y evitar que cayera la muestra. Una vez fuera del agua, el otro extremo se cubrió con un tapón del mismo material; el tubo de PVC se cortó a la altura de la muestra colectada y finalmente se cubrió con otro tapón de PVC. Las muestras fueron etiquetadas y transportadas al Laboratorio del Departamento de Geología de la Universidad de Jaén para su posterior análisis. Se midieron *in situ* sus parámetros fisicoquímicos (tabla 1).

Tabla 1. Parámetros analizados y equipos utilizados en este estudio.

Parámetro	Equipo
Muestras de agua	
Oxígeno disuelto (mg/L)	HACH HQ2200 Multi/2 canales
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
Potencial de hidrogeniones (pH)	
Potencial de oxidación-reducción (eH)	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	
Turbidez (NTU)	HANNA HI 98713
Muestras de sedimento	
Potencial de hidrogeniones (pH)	HANNA HI 98168 GroLine
Potencial de oxidación-reducción (eH)	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	HANNA HI 993310

Fuente: elaboración propia.

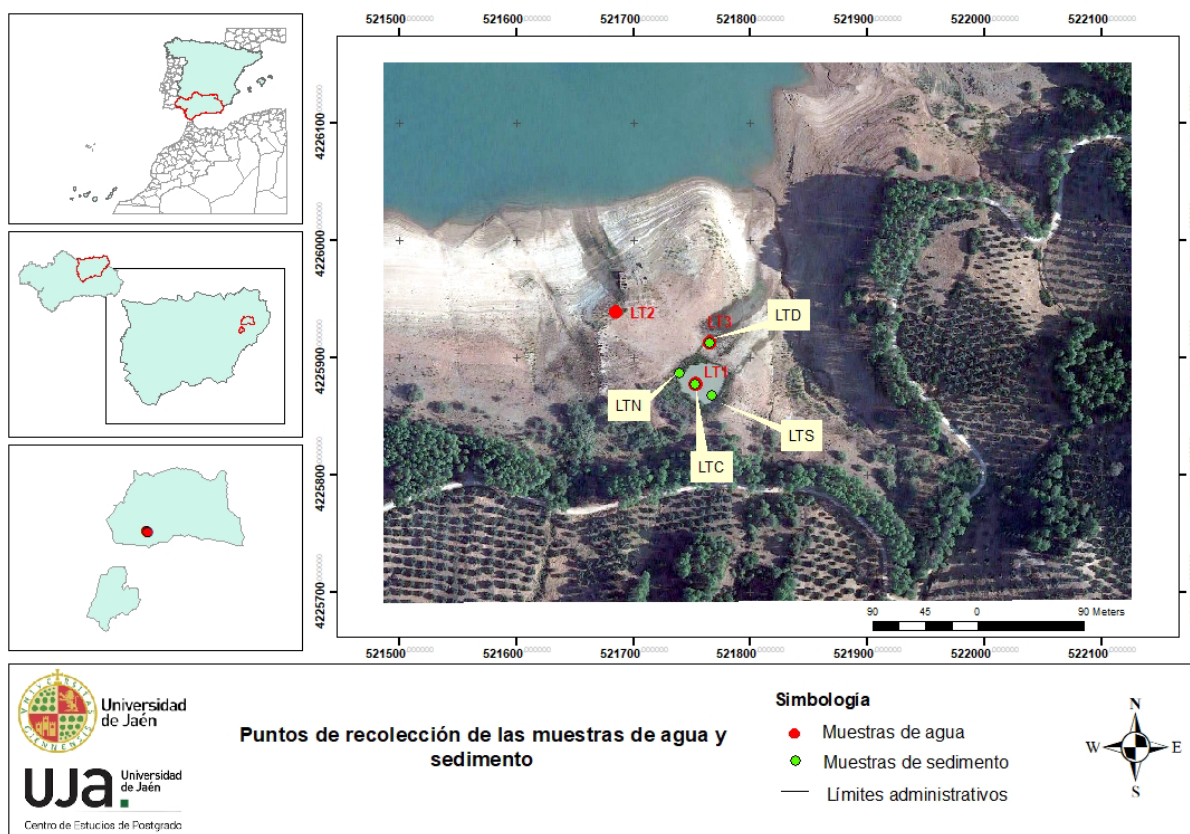


Figura 4. Localización de los puntos de muestreo de agua y sedimento en el humedal Laguna del Tranco. Fuente: elaboración propia.

4.2 Trabajo de laboratorio

En esta etapa de investigación, las muestras de agua y sedimento fueron enviadas y determinadas en diferentes Laboratorios de la Universidad de Jaén y la Universidad de Almería. A continuación, se describe cada uno de los procedimientos realizados y los laboratorios en donde se llevaron a cabo las determinaciones tanto de las características hidrogeoquímicas e isotópicas del agua, así como, de las mineralógicas de sedimento.

4.2.1 Determinación hidrogeoquímica e isotópica de las aguas

Todas las muestras de agua recogidas durante la salida a campo fueron filtradas en el Laboratorio del Departamento de Geología de la Universidad de Jaén por medio de filtros de nitrato de celulosa Millipore de 0.45 μm ; posteriormente, las muestras filtradas fueron utilizadas para su determinación cuantitativa y cualitativa.

4.2.1.1 Alcalinidad.

Para determinar la concentración de iones bicarbonato (HCO_3^-) de las muestras de agua, se utilizaron alícuotas de 40 mL. Su determinación se realizó mediante un equipo 848 Titrino plus de la marca Metrohm del Departamento de Geología de la UJA. El equipo es un titulador universal que efectúa titulaciones volumétricas de tipo dinámico a punto de equivalencia, donde la adición de reactivo (HCl 0.1 N) se realiza en etapas de volumen constantes. Las valoraciones ácido-base realizadas por el equipo utilizan un potenciómetro como electrodo, cuyo potencial depende de la cantidad de iones H^+ presentes en la muestra de agua.

Las valoraciones de este equipo se presentan en curvas de valoración que pueden ser expresadas en mg/L. Donde la variable independiente de la curva de valoración corresponde al volumen añadido de HCl 0.1 N; Mientras que la variable dependiente es la concentración del ion bicarbonato correspondiente a la valoración.

4.2.1.2 Determinación de aniones y cationes.

Para la determinación de aniones y cationes se utilizó el método de cromatografía de intercambio iónico. Este es un proceso que permite la separación de iones y moléculas polares, basado en las propiedades de carga de las moléculas y suele ser utilizada para analizar cualquier tipo de molécula que presente una carga, ya sea esta positiva o negativa (Faz, Moreno y Rosales, 2013).

En términos muy generales, el método se compone de dos fases, la primera, una fase estacionaria o de intercambio iónico y, la segunda, una fase móvil.

La fase estacionaria contiene superficies iónicas que permiten interacciones dipolares con los analitos de la muestra; esta fase suele llevar en la superficie cargas electroestáticas fijas que retienen contraiones intercambiables con los de la fase móvil. Esta última fase, contiene las especies iónicas que compiten con los analitos para ocupar sitios activos de la fase estacionaria (Pássaro et al., 2016).

4.2.1.2.1 Preparación y análisis de las muestras

Debido a las características de conductividad eléctrica de las muestras, se realizaron las siguientes diluciones:

Tabla 2. Disoluciones utilizadas para la determinación de aniones y cationes.

Muestra	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Dilución	Descripción
LT1	1940	1:2	20 mL de muestra en 20 mL de agua
LT2	1906	1:2	20 mL de muestra en 20 mL de agua
LT3	3690	1:4	10 mL de muestra en 30 mL de agua

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis de las muestras se utilizó un equipo 850 Professional IC – AnCat (2.850.3010) marca Metrohm con Autosampler plus modelo 919 IC del Laboratorio del Departamento de Geología de la Universidad de Jaén. El equipo se conecta por medio de USB a un ordenador en el que se está instalado el software con el que se maneja el equipo (MagIC Net). De acuerdo con su manual de uso, este equipo mantiene una temperatura constante, que aunado a su caja Faraday y su procesamiento digital de señal, garantizan presiones y límites de detección de hasta 0.1 mg/L (Metrohm, s/f).

El eluyente utilizado para aniones fue Na_2CO_3 a 3.20 N y NaHCO_3 a 1.0 N; además, se utilizó el dosino 800 (H_2SO_4 : concentrado) de la marca Metrohm, necesario para la analítica. Para los cationes, se utilizó como eluyente HNO_3 a 1.70 mN y dipicolínico ($\text{C}_7\text{H}_5\text{NO}_4$) a 1.70 mN (Hernández, 2016).

4.2.1.3 Determinación de metales y elementos minoritarios

En lo que respecta a la determinación de metales pesados y elementos minoritarios, se utilizó la técnica de Espectrometría de Masas con Fuente de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). Esta es una técnica ampliamente usada para el análisis elemental ya que presenta diversas ventajas en relación con su alta productividad, elevada sensibilidad, precisión y exactitud en los resultados analíticos (Ríos y Hernández, 2020). En términos muy generales, las determinaciones mediante ICP-MS ocurren en cuatro fases.

En una primera fase, se introduce la muestra líquida a analizar previamente filtrada ($0.45\ \mu\text{m}$) y acidificada ($\text{pH} < 2$). En seguida, las muestras de agua son transportadas hacia el plasma, donde serán vaporizadas e ionizadas. En una tercera etapa, los iones son separados en función de la relación masa/carga (m/z) que exhiban durante su paso en un cuádruplo. Por último, los iones llegan hasta un detector conectado a un equipo de cómputo en donde está instado el software con el que se determinará cuantitativa y cualitativamente la concentración de los elementos analizados (Ugarte, 2011).

Tres muestras de agua fueron enviadas al Centro de Instrumentación de Apoyo a la Investigación Técnica de la Universidad de Jaén [CICT]. El equipo utilizado para el procesamiento de las muestra fue un espectrómetro ICP-MS 7900 de la marca Agilent. De acuerdo con el CICT (2022a), este ICP-MS permite analizar la mayoría de los elementos de la tabla periódica en un amplio rango de concentraciones que van desde ppb hasta ppm. Además, cuenta con un sistema completo de conexión/interfase LCICPMS que permite trabajar en especiación con un tandem HPLC-ICPMS; incluye un software cromatográfico MassHunter Work Station, que permite por un lado el control del equipo y por otro, el desarrollo de métodos analíticos para la adquisición y posterior tratamiento de datos.

4.2.1.4 Determinación isotópica.

El uso de isótopos estables del agua como una herramienta para explorar los procesos hidrológicos e hidrogeológicos ha cobrado relevancia en las últimas dos décadas (Valenzuela et al., 2013). Dado su carácter conservador, los isótopos del agua, particularmente $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se han convertido en buenos trazadores pasivos naturales que reflejan la historia de cambio de fase del agua (Mahindawansa et al., 2018). Principalmente, estos, han sido utilizados como trazadores de los procesos hidrológicos y del clima pasado, ya que los isótopos ligeros y pesados

en las moléculas de agua se fraccionan con variaciones en las condiciones físicas durante los cambios de fase (He et al., 2018).

Además, dada la fuerte covarianza existente entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación, estos isótopos han sido utilizados para construir “líneas meteóricas” locales, regionales y globales, sirviendo de base para evaluar el origen de las aguas subterráneas modernas y antiguas (Quiroz y Martínez, 2021). En este sentido, Graf et al. (2019) sustentan que la composición de isótopos estables del agua es cuantificada usando proporciones de isótopos, definidos como la concentración de la proporción de isótopos pesados (e.g. $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ o $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$) sobre la abundancia de los isótopos ligeros (e.g. $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$). Por su parte, Jiménez y Custodio (2008) sostienen que el exceso de deuterio se define por la ecuación $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$ y que sus valores adquiridos durante la evaporación no cambian de manera significativa durante la evolución posterior de la masa nubosa, salvo por evaporación, de manera que es un indicador fiable del origen de ese vapor.

Sobre este entendimiento, para la determinación de la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y Deuterio ($\delta^2\text{H}$) de las dos muestras de agua (LT2 y LT3), se utilizaron alícuotas de 5 mL. Las muestras fueron transportadas en tubos de polipropileno, estériles con rosca hermética, hasta la Universidad de Almería, España, donde se realizó su debido análisis. Para ello, se utilizó un espectrómetro laser CRDS (Cavity Ring Down Spectroscopy), Picarro modelo L2140-i. Este analizador permite medidas simultaneas de los isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en agua y vapor de agua. Además, el analizador determina un exceso de ^{17}O a menos 0,015 ‰.

4.2.2 Determinación mineralógica de los sedimentos del humedal

Un elemento clave en la caracterización de las interacciones agua-roca y la dinámica sedimentaria en un cuerpo de agua, es la identificación de los minerales y su procedencia. En este sentido, Last (2002) sostiene que los minerales son componentes fundamentales de los sedimentos, de manera que su determinación proporciona un entendimiento acerca de su composición mineralógica, esencial, para describir y discutir adecuadamente los materiales que ahí se transforman y/o transportan. Algunos autores como Alcántara et al. (2000) y Rocha et al. (2005) sugieren que el procedimiento habitual para el estudio mineralógico de sedimentos consiste en la comparación de su composición. Al respecto, estos autores señalan que el análisis cuantitativo y cualitativo de los espectros de Difracción de Rayos X (DRX) son una herramienta útil para dicho fin, incluso, sostiene que la DRX permite discriminar polimorfos y variaciones composicionales en los minerales.

4.2.2.1 Difracción de Rayos X (DRX).

Para la determinación mineralógica de las muestras de sedimento se utilizó la técnica de DRX, ya que provee información detallada acerca de la estructura atómica de las sustancias cristalinas que contienen. De acuerdo con Harris y White (2008), los rayos X son producidos por la rápida desaceleración de los electrones que se mueven rápidamente cuando inciden sobre la materia. Estos autores sostienen que, la producción de rayos X para este tipo de análisis se logra utilizando un tubo de rayos X, mismo que consta de una fuente de electrones en forma de filamento (cátodo) y un objetivo de metal (ánodo). La activación del tubo implica pasar una corriente a través del filamento para establecer una corriente (e.g. 20-40 mA) bajo alto voltaje (e.g. 40-60 kV) entre el filamento y el objetivo.

Una vez generados los rayos X por el tubo de rayos X, estos, son filtrados para producir una radiación monocromática, colimada concentrada y, dirigida hacia la muestra (Bunaciu et al., 2015). La interacción de los rayos incidentes con la muestra produce interferencias constructivas (y un rayo difractado) cuando las condiciones satisfacen la Ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \Theta$$

Donde n es una integral, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es el espacio interplanar generado de la difracción, y Θ es el ángulo de difracción. Esta ley relaciona la longitud de onda de la radiación electromagnética con el ángulo de difracción y el espaciado de la red en una muestra cristalina. De modo que, se puede obtener un valor de d determinado para diferentes formas químicas (Warren, 1990).

4.2.2.1.2 Preparación y análisis de las muestras.

Los cuatro testigos de sedimentos recogidos en Laguna del Tranco fueron procesados en el Laboratorio del Departamento de Geología de la UJA. Cada muestra se extrajo cuidadosamente de los tubos de PVC y se colocaron sobre tubos del mismo material cortados por la mitad, cuidando de diferenciar entre el techo y el muro de las muestras. Cada testigo de sedimento fue dividido en porciones de 5 cm, dirección techo-muro, dejando un espacio entre cada porción de 2.5 cm. De manera que para el testigo LTD se obtuvieron 3 submuestras; para LTC, 7 submuestras; y para las muestras LTS y LTN se extrajeron 5 submuestras.

De las 20 submuestras analizadas solo se consideraron en la comparación entre sitios un total de 18, mediante 18 polvos y 18 AOT, procurando en todos los casos tener un numero de

horizontes (profundidades) comparables. Cada submuestra se numero de 1 a n , donde 1 es la porción de sedimento más superficial y en medida que la numeración se aleja, la submuestra corresponde a una sección más profunda del testigo.

Cada una de las submuestras se colocó en porciones de aluminio debidamente etiquetas, para después, llevarlas a una estufa analógica de secado marca J.P. Selecta a temperatura constante de 60°C durante 48 hrs. Una vez que las todas muestras estuvieron secas, estas, fueron colocadas en bolsas herméticas de polipropileno debidamente etiquetadas y fueron llevadas a la unidad de procesamiento mecánicos de muestras del CICT de la UJA, en donde se trituraron hasta obtener una fracción en forma de polvo. Después, el polvo de cada una de estas muestras se colocó en tubos de polipropileno con rosca hermética y debidamente etiquetados. Las muestras en polvo fueron enviadas a la unidad de difracción de rayos x del CICT, en donde se realizaron barridos con luz monocromática de un ánodo de cobre en un rango de 4 a 51 2θ . Para ello se utilizó difractómetro de rayos X de la marca Panalytical modelo Empyrean, mismo que cuenta con un goniómetro de geometría θ/θ de alta precisión que permite trabajar en reflexión con radio de hasta 240 mm.

4.2.2.1.3 Preparación de agregados orientados.

Dado que la cristalinidad, como la expresión de orden de los minerales de partículas menores a 2 μ , es relativamente baja, la DRX suele no ser muy concluyente, por lo que es necesario conseguir una ordenación adicional de los minerales que se desean diferenciar (Plana et al., 1982). Para ello fue necesario tomar 2 gramos de cada muestra de polvo de sedimento; cada muestra se colocó en tubos de ensayo de 100 mm x 10 mm. A cada tubo se le agregó una cantidad de agua suficiente hasta lograr la suspensión y, posteriormente agitar hasta su homogeneización.

Alícuotas de 1 mL de solución fueron tomadas de cada tubo de ensayo y se colocaron sobre placas de vidrio circular de 3 cm de diámetro y 2 mm de espesor, cada una debidamente etiquetada. Las placas se dejaron secando a temperatura ambiente hasta lograr la evaporación total del agua. Para su análisis se utilizó el mismo equipo de DRX y las mismas condiciones de barrido que en el punto 4.2.2.1.2.

4.2.2.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB).

Un elemento relevante del análisis mineralógico de los componentes que conforman las partículas de sedimento está relacionado con la obtención de información sobre topografía,

composición y estructura cristalográfica de las muestras. Algunos autores como Suarez y Orfeo (2015) sugieren que técnicas como la MEB ofrecen una potente evaluación de las características de los materiales minerales que son movilizados en los sistemas acuáticos, permitiendo su observación y caracterización morfológica. En este sentido, la MEB sustituye la longitud de onda de la luz visible por un haz de electrones con el que se consigue una resolución superior a cualquier otro microscopio óptico (MO), permitiendo evidenciar estructuras más pequeñas.

El haz de electrones que utiliza la MEB bombardea la muestra, que en respuesta, emite electrones secundarios y retrodifundidos; estos electrones llegan a un detector en donde se formará la imagen (Vera et al. 2018). Particularmente, los electrones secundarios están caracterizados por una energía baja (20-50 eV), se dispersan inelásticamente por interacción de los electrones del haz incidente con la muestra y llegan sólo a la superficie aquellos que se han originado en una pequeña zona cercana a la superficie de la muestra. Por otro lado, los electrones retrodifundidos se caracterizan por una energía próxima a la del haz incidente (10-30 keV), son originados a una profundidad por debajo de los electrones secundarios, permitiendo detectar variaciones en la composición de los distintos puntos de la muestra (Umbría, 1999).

En otras palabras, los electrones secundarios son los que permiten obtener las imágenes de máxima resolución, mientras que los electrones retrofundidos posibilitan diferenciar zonas de la muestra según su número atómico, de manera que las de mayor número atómico serán más brillantes en la imagen. A diferencia de las imágenes que se obtienen con un MO, el MEB no forma una imagen real del objeto, sino que construye una virtual a partir de los electrones emitidos por la muestra (Ipohorki y Bozzano, 2013). Además, los equipos de MEB cuenta con un detector de rayos X de energía dispersiva (EDX) que recoge un espectro único emitido por todos los elementos de la muestra a la vez, generando un impulso eléctrico para cada fotón de rayos x incidente, de tal forma que es posible cualificar los elementos mayoritarios presentes en la muestra (Morales et al., 2015).

4.2.2.2.1 Preparación y análisis de las muestras.

A partir de los resultados preliminares obtenidos de la DRX de las muestras, se tomaron cuatro submuestras superficiales de los testigos de sedimento previamente secadas. Las muestras se obtuvieron con ayuda de un mortero de mármol, intentado obtener una pequeña muestra de características más o menos planas en su superficie. Estas muestras corresponden a LTC1, LTN1, LTS1 y LTD1.

Las fracciones de sedimento obtenidas se colocaron sobre placas de aluminio (porta muestras para MEB) debidamente etiquetadas y se fijaron a la superficie de la placa con grafito coloidal a base de alcohol. Las cuatro muestras se llevaron a la Unidad de Microscopía Electrónica del CICT de la UJA, en donde se metalizaron con una capa muy fina de carbono. El equipo que se utilizó para el análisis de las muestras es un microscopio electrónico de barrido de alta resolución marca Carl Zeiss modelo MERLIN, con capacidad analítica de EDX de Oxford.

De acuerdo con el CICT (2022b) este equipo utiliza un cañón de emisión de electrones por emisión de campo de punta caliente; su rango de potencial de aceleración está comprendido entre 0.02 V y 30 kV, mientras que su corriente de haz abarca de 10 pA a 300 nA. Además, cuenta con un detector de rayos X, Oxford Inca Energy 350-MAX 50, con resolución lineal de 127 eV en Mn K α de 1 a 100.000 cps. Por último, hay que mencionar que este equipo utiliza un software SmartSEM que permite controlar los parámetros del equipo, almacenar y trabajar sobre las imágenes obtenidas.

4.3 Trabajo de gabinete

Una vez que se obtuvieron los resultados de los análisis realizados a las muestras, tanto de agua como de sedimento, se procedió a realizar diferentes tratamientos estadísticos, de interpretación de difractogramas y procesamiento de imágenes. Para ello, se utilizaron una serie de aplicaciones de software para cada caso. A continuación, se aborda cada uno de ellos:

4.3.1 Análisis de datos de agua

Para el procesamiento de los datos obtenidos de la caracterización hidrogeoquímica de las muestras de agua, se utilizó la aplicación en formato Excel INAQUAS (Moreno et al., 2009) que cuenta con licencia del Departamento de Geología de la UJA. Esta aplicación ayuda en la interpretación de análisis químicos de aguas subterráneas destinadas a diversos usos, aunque puede también ser utilizada para aguas superficiales. Además, la aplicación permite el almacenamiento de datos analíticos, elaboración de gráficos y hacer cálculos de uso frecuente en análisis de calidad e hidrogeoquímica del agua. Adicionalmente, para calcular los balances de carga de las aguas se utilizó el software de informes y análisis de datos de calidad de agua AquaChem 11.0. que cuenta con licencia del Departamento de Geología de la UJA.

4.3.2 Interpretación de difractogramas

Respecto al procesamiento e interpretación de los difractogramas obtenidos de la DRX de las muestras de sedimento, se utilizó el programa de Software HighScore Plus v3.0 con licencia de la UJA. En términos generales, este software permite ejecutar análisis cuantitativos y cualitativos basados en el método de refinamiento de Rietveld tanto de forma automática como manual. Una cualidad de este software es que las imágenes generadas pueden ser exportadas en diversos formatos (incluidas JPG) para su posterior uso. La caracterización de los picos se realizó mediante la comparación y comprobación con diferentes bases de datos mineralógicas, que incluyen productos ICDD de calidad superior -propios del software-, la base de datos de American Mineralogist Crystal Structure Database y el Handbook of Mineralogy (Disponible en <http://www.handbookofmineralogy.org/index.html>).

4.3.3 Procesamiento y visualización de imágenes de MEB

El procesamiento y visualización de imágenes de la MEB obtenidas, se realizó con ayuda la plataforma online del software INCA Energy. Esta plataforma permite visualizar de manera particular las diferentes características o sitios de interés sobre la muestra. El acceso se hace mediante un árbol de datos sobre una barra de navegación en el que se ubican todas las imágenes el proyecto. Las imágenes fueron exportadas en formato JPG para su posterior uso y determinación.

5. Resultados y discusión

5.1 Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las aguas del humedal

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las fases de análisis hidrogeoquímico que se realizaron a las tres muestras de aguas recolectadas en campo. Es preciso mencionar que el error del balance de carga iónica para los resultados obtenidos fue siempre menor al 10%, que es un error aceptable para los fines de este estudio e indican la precisión del análisis químico (Choi et al., 2014; Najib et al., 2017).

5.1.1 Caracterización de metales y elementos minoritarios

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los parámetros fisicoquímicos e hidrogeoquímicos de los puntos de agua analizados. Asimismo, los valores obtenidos se compararon con los valores de referencia para la calidad del agua de consumo humano de la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) (2017) y los valores propuestos por Mgbenu y Egbueri, (2019).

En términos generales, las propiedades físicas en las aguas se encontraron por debajo de valores de referencia, con excepción de la conductividad que exhibió la muestra LT3 (3690 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Dado que la conductividad eléctrica es la capacidad del agua de hacer pasar corriente, la conductividad eléctrica es un indicador del material disuelto en el agua (Heath, 1983), por lo que, a mayor conductividad, mayor cantidad de iones disueltos existen. En lo que respecta al pH, las aguas tienen una tendencia hacia la neutralidad, aunque para el caso específico de LT1, esta tendencia se inclina hacia aguas de carácter básico. En general, la conductividad tiene valores elevados claramente por encima del valor de referencia de WHO.

Tabla 3. Análisis fisicoquímico de las aguas del humedal (febrero 2022). [T= °C; C.E. = $\mu\text{S}/\text{cm}$; *= mg/L; otros = $\mu\text{g}/\text{L}$].

Grupo de parámetros	Parámetro	Muestras			Valor de referencia (WHO 2017; Mgbenu y Egbueri, 2019)
		LT1 Humedal	LT2 Manantial	LT3 Manantial	
Parámetros físicos	pH	8.18	7.45	7.72	6.5-8.5
	C.E.	1940	1906	3690	1000
	% O.D.	10.1	2.20	5.93	-
	Temp.	9.2	27	24	-

Grupo de parámetros	Parámetro	Muestras			Valor de referencia (WHO 2017; Mgbenu y Egbueri, 2019)
		LT1 Humedal	LT2 Manantial	LT3 Manantial	
Iones químicos (aniones y cationes)	F ⁻	0.329	0.752	0.53	1.5
	Cl ⁻	169.87	187.83	219.88	200-300
	SO ₄ ^{-2*}	214.64	1014.46	95.996	500
	HCO ₃ ^{-*}	315.23	305.1	244.08	250
	NO ₃ ^{-*}	2.67	2.70	5.32	50
	Na ⁺	138.83	144.46	160.99	200
	K ⁺	7.01	8.69	9.58	12
	Ca ^{+2*}	82.80	379.06	60.10	75
	Mg ^{+2*}	33.74	48.42	24.48	50
Metales pesados y elementos	Fe	284.27	532.59	939.26	3000
	Mn	106.71	49.40	76.90	500
	Cu	82.31	1349.20	343.28	2000
	Zn	141.12	149.61	176.21	4000
	Cr	0.63	1.09	0.50	50
	Cd	0.18	0.12	0.04	3
	Pb	0.92	1.36	0.75	10
	As	2.54	5.62	8.57	10
	Se	0.24	0.34	0.22	10
	Hg	0.43	2.35	1.28	6
	B ⁺	0.12	0.12	0.24	0.5
	Ag	0.10	0.13	0.69	100
	Al	411.34	980.53	483.75	2000
	Ba	237.49	244.51	57.76	1300
	Be	0.00	0.00	0.02	12000
	Co	0.30	0.33	0.24	5000
	Mo	2.07	1.01	3.01	70
	Ni	0.94	2.66	1.03	70
	Sb	0.36	0.20	0.08	10
	TL	0.02	0.05	0.03	0.1
	U	2.48	3.89	1.66	30

Fuente: elaboración propia con base en WHO (2017) y Mgbenu y Egbueri (2019).

El predominio de aniones y cationes está en el orden HCO₃⁻ > SO₄⁻² > Cl⁻ > F⁻ > NO₃⁻ y Na⁺ > Ca⁺² > Mg⁺² > K⁺, respectivamente. De manera particular, se encontró que las aguas del humedal y la

surgencia del manantial LT2 exhibieron concentraciones por encima de los valores de referencia para el HCO_3^- y el Ca^{+2} . Además, el agua de LT2 exhibió valores para el SO_4^{-2} (1014.46 mg/L) muy superior al valor de referencia (250 mg/L). Por su parte, las aguas de LT3 exhibieron valores de cationes y aniones aceptables.

En lo que respecta a metales pesados y minoritarios con mayor abundancia en las muestras corresponden al Fe, Mn, Cu, Zn, Al y Ba que presentaron valores por arriba de los 100 $\mu\text{g/L}$, llegando incluso a alcanzar valores por encima de los 1000 $\mu\text{g/L}$ como en el caso del Cu contenido en la muestra LT2. El resto elementos analizados exhibió valores muy por debajo de los 10 $\mu\text{g/L}$, aun cuando el límite máximo permisible se ubica en valores de 12000 $\mu\text{g/L}$ como es el caso del Be. De manera general, se puede afirmar que a pesar de la gran abundancia de algunos elementos pesados y minoritarios, todos los valores se ubican por debajo de los límites permisibles para el consumo humano.

Los resultados indican que estas aguas “podrían ser apropiadas” para el consumo humano, ya que si bien, se encontraron valores relativamente altos para algunos de los aniones y cationes analizados, estos, no representa un problema real para la salud humana más allá de la palatabilidad aceptable que pueda tener el consumidor (WHO, 2017). Empero, esta afirmación debe ser tomada con cautela, ya que este estudio no consideró variables como los sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales y análisis microbiológicos que suelen ser relevantes para determinar la calidad del agua y su potabilidad para el consumo (Mgbenu y Egbueri, 2019). No obstante, es preciso mencionar que durante la colecta de muestras se observó de manera directa un color marrón en las aguas del humedal, mientras que para las aguas de las surgencias LT2 Y LT3, no se observó color aparente.

5.1.2 Caracterización de aniones y cationes

El diagrama de Piper es uno de los más utilizados para la representación de las muestras de agua en un triángulo para aniones, otro para cationes y un rombo para ambos. Este diagrama permite localizar la familia de aguas y establecer sus facies hidroquímicas. Estos diagramas nos ayudan a realizar un reconocimiento de la evolución de las composición de las aguas y ver la evolución de mezclas de aguas más o menos mineralizadas. No obstante en los últimos años, se han realizado algunas adaptaciones al diagrama original, de modo que se han adaptado siete criterios de clasificaciones diferentes, desde el agua dulce hasta agua de mezcla conservadora (Kelly, 2005). En este estudio, los resultados químicos se compararon con la superposición de los diagramas de Kelly (2005) y Piper (1944) (Fig. 5).

Los resultados obtenidos demuestran que la caracterización por facies de las aguas de las muestras LT1 y LT3 pertenecen a facies cloruradas sódicas, aunque, se puede distinguir que las aguas de la muestra LT1 provienen de una mezcla con tendencia $\text{CO}_3\text{-Cl}$, mientras que LT3 se inclina hacia una mezcla de tipo Cl-HCO_3 . Por su parte, la muestra LT2 se caracterizan por ser de una facie en la que dominan aguas sulfatadas cálcicas. De acuerdo con el diagrama de Kelly (2005) se encontró que las aguas de las muestra LT1 y LT3, son ligeramente una mezcla conservativa en donde coinciden aguas saladas y dulces, mientras que la muestra LT2 corresponden a aguas claramente intrusivas.

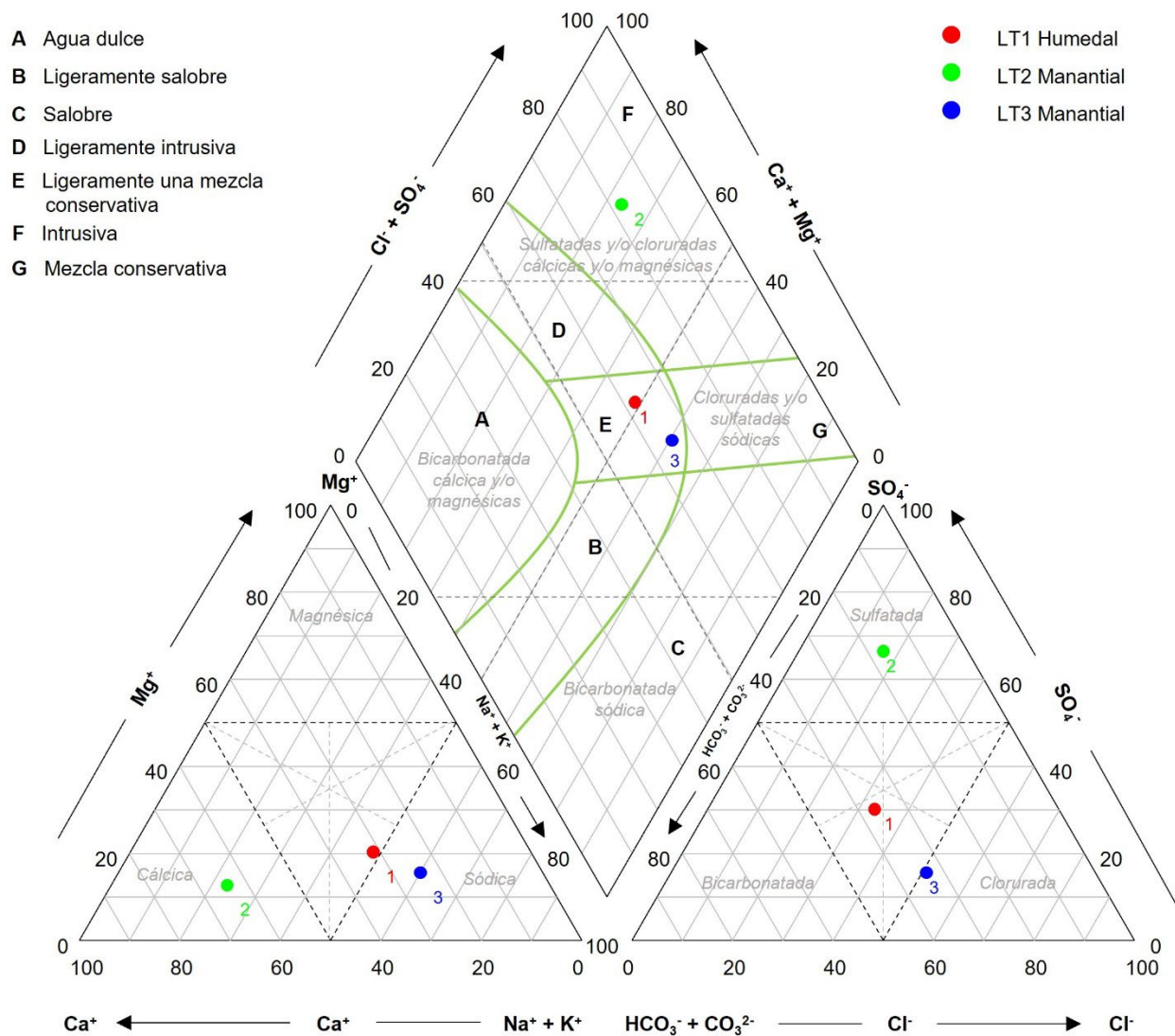


Figura 5. Facies químicas del agua en La Laguna del Tranco basado en los diagramas de Piper (1944) y Kelly (2005). Fuente: elaboración propia.

5.1.3 Índices de saturación de las principales fases minerales

Para establecer las transformaciones que se producen en el medio acuoso natural se pueden calcular los índices de saturación (IS) correspondientes a los minerales que pueden precipitar o disolver en las aguas subterráneas estudiadas. En general, valores positivos indican que el medio acuoso está sobresaturado respecto a una determinada especie mineral y, por tanto, podría precipitar. Por el contrario, valores negativos indican que el agua aparece subsaturada respecto a un mineral concreto y cuando dicha agua entra en contacto con estas especies minerales puede disolverlas. Por otro lado, valores cercanos al cero -en un rango de -0.5 a 0.5- indican que las fases minerales pueden presentarse en el agua en condiciones de equilibrio respecto a los minerales analizados (anhidrita, aragonito, calcita, dolomita, yeso y halita).

Particularmente, la anhidrita, el yeso (para LT1 y LT3) y la halita exhiben valores de subsaturación que indican posibles procesos de disolución de estas fases minerales, toda vez que el agua del humedal y la surgencia interaccionan con ellas, lo anterior, considerando que la reacción no esté cinéticamente impedida por acción del pH, temperatura, etc. En lo que respecta al aragonito y la calcita para las muestras LT1 y LT2, los valores son positivos, algo superiores a 0.5, indicando una ligera predisposición para la precipitación de estas fases minerales. Las fases minerales que pueden estar presentes y en equilibrio con el agua son dolomita y yeso para LT2 y aragonito y calcita en el caso de LT3.

Es evidente que la fase mineral con mayor capacidad de disolución corresponde a halita con valores altamente negativos de IS. De hecho, el análisis de iones químicos (Tabla 3) permite sostener lo anterior, ya que se encontraron contenidos dominantes para los cationes Na^+ y Ca^{+2} que reflejan la disolución de los minerales que contienen estos iones en sus configuraciones químicas, como es el caso de halita y anhidrita. Por su parte, las altas concentraciones de los aniones HCO_3^- y SO_4^{-2} indican que tanto la meteorización del ácido carbónico como la del sulfato son dominantes sobre el área de estudio. Probablemente, los bicarbonatos se derivaron de la meteorización de rocas y minerales carbonatados y/o del CO_2 atmosférico y del suelo. Mientras que las concentraciones de SO_4^{-2} puede deberse a la disolución de minerales como el yeso y la anhidrita que han sido arrastrados hasta el humedal.

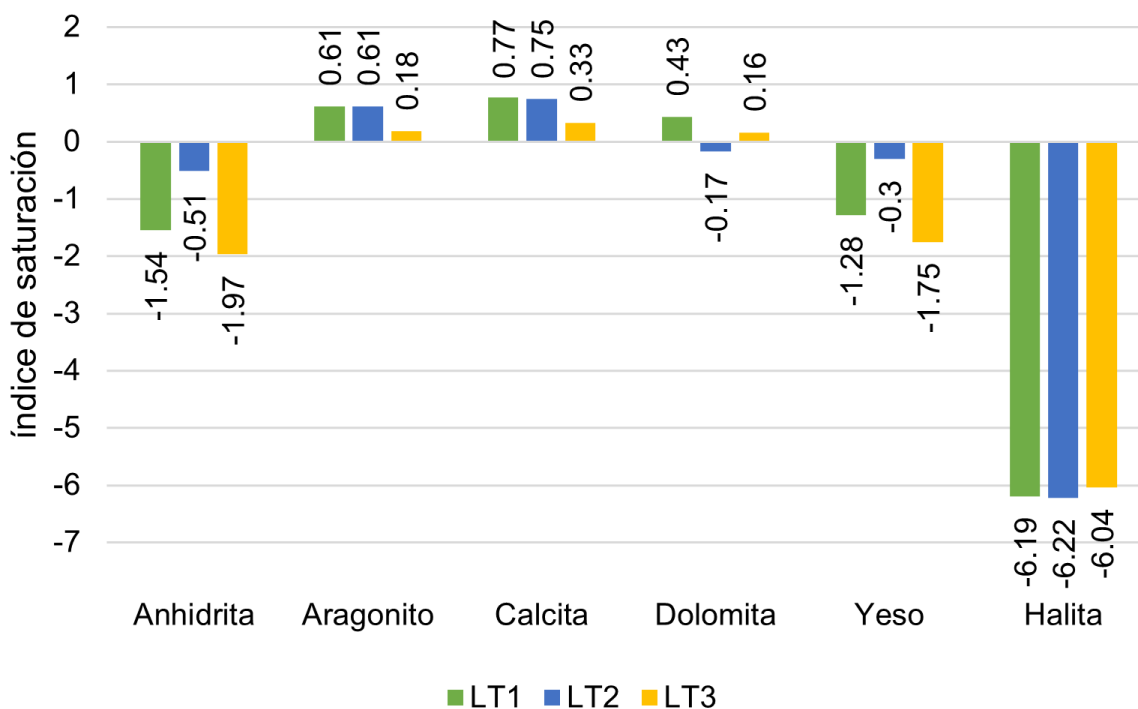


Figura 6. Índices de saturación de las principales fases minerales solidas en las aguas del humedal La Laguna del Tranco. Fuente: elaboración propia.

5.1.4 Caracterización isotópica

En lo que respecta al origen de las aguas de las dos surgencias cercanas al humedal, la Figura 7 muestra la comparación de los valores isotópicos de LT2 y LT3 con la Línea Mundial de las Aguas Meteóricas (LMM) (Craig, 1961), la Línea de las aguas Meteóricas del Mediterráneo (LMMOC) (Morales et al., 2019) y la Línea de las aguas Meteóricas del Atlántico (LMATLAN) (Morales et al., 2019). El análisis sugiere que las aguas de los dos puntos de muestreo es una mezcla que posiblemente provengan de dos acuíferos diferentes, el de La Sierra de Cazorla y el de Las Sierras de Quesada-Castril (Fig. 2), ya que desde el punto de vista hidrológico, las propiedades de estas rocas concuerdan con la composición de estas aguas. Además, estas aguas corresponde a un manantial que presenta dos (o más) surgencias. Particularmente, se encontró que la tendencia de los valores isotópicos para las dos surgencias corresponde a una presencia de agua de lluvia descrita por la LMM y la LMMOC. Además, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰)_{VSMOW} permiten indicar que la altura de recarga de estas aguas se encuentra en un rango de 1460 a 1480 msnm (Fig. 8), mientras que su descarga ocurre a 950 msnm.

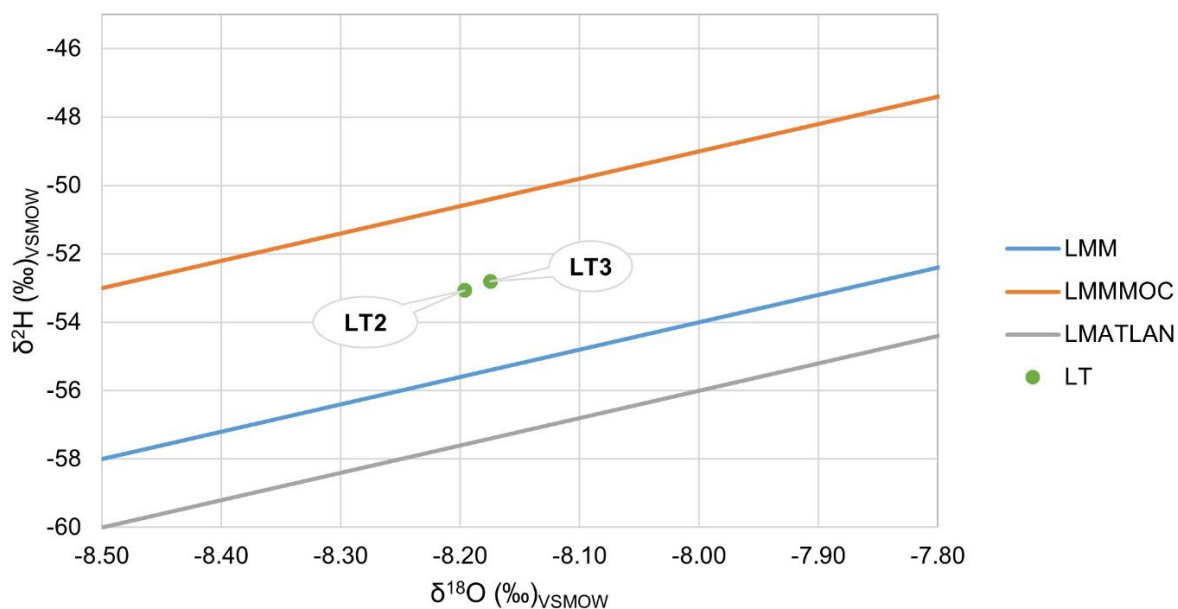


Figura 7. Comparación de los valores isotópicos de las dos surgencias del manantial asociado al Humedal La Laguna del Tranco con la Línea Mundial de las Aguas Meteóricas (LMM) (Craig, 1961), la Línea de las aguas Meteóricas del Mediterráneo Occidental (LMMMOC) (Morales et al., 2019) y la Línea de las aguas Meteóricas del Atlántico (LMATLAN) (Morales et al., 2019). Fuente: elaboración propia.

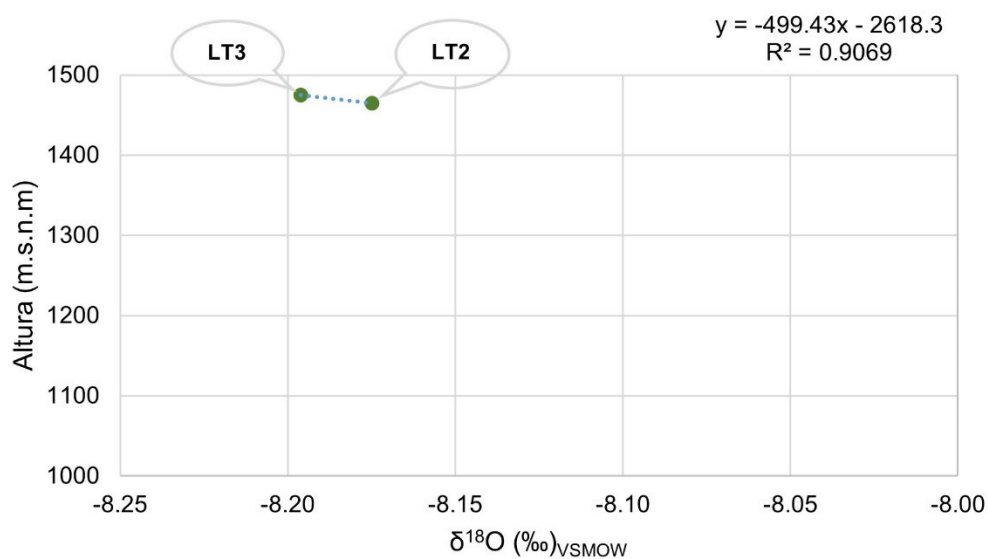


Figura 8. Relación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰)VSMOW y la altitud de del colector de lluvia del vertiente occidental (Morales et al., 2019). Fuente: elaboración propia.

5.2 Caracterización mineralógica de los sedimentos del humedal

En términos generales, se encontró que los minerales depositados en el Humedal La Laguna del Tranco corresponden a materiales sedimentarios no consolidados, donde el agente principal de transporte, depósito y erosión es el movimiento del agua de lluvia, bajo la acción de la escorrentía hacia las partes bajas; en menor medida, se encuentra la acción eólica y la formación autigénica. Durante las lluvias, el flujo de detritos y materiales erosionados por el agua desciende de las zonas con pendientes más pronunciadas hacia las menos pronunciadas, esporádicamente estas aguas inundaban El Embalse del Tranco y cubrían el Humedal, aunque en los últimos años las sequías que azotan a la región lo han hecho casi imposible, permaneciendo la laguna emergida de forma permanente.

Los sedimentos del Humedal corresponden a materiales de tamaño de grano fino y muy fino, de tonalidades que van de colores marrón claro a tonalidades ligeramente gises. En algunos casos se encontraron restos de materia vegetal acompañados de olor a ácido sulfhídrico y metano. En la Tabla 4 se muestran los minerales identificados en este estudio y algunas de sus principales características.

Tabla 4. Principales características de la asociación mineralógica predominante en el Humedal la Laguna del Tranco.

Clasificación mineral según Strunz (10ª ed.)	Mineral	Fórmula química	Observaciones generales
Clase 2: Sulfuros y sulfosales	Pirita	FeS_2	Se forma en ambientes reductores y persiste sólo cuando se obtienen estas condiciones. Aparece como segregaciones magmáticas, como mineral accesorio en rocas ígneas, en pegmatitas; en depósitos metamórficos de contacto, también en rocas metamórficas; así como reemplazos diagenéticos en rocas sedimentarias.
Clase 4: Óxidos e hidróxidos	Cuarzo	SiO_2	Es casi omnipresente en los suelos y sedimentos; es un mineral residual. Es el componente más común de las fracciones de arena y limo. Está presente en venas hidrotermales, epitermales alpinas y depósitos hidrotermales de metales; común en rocas carbonatadas.
Clase 5: Carbonatos y nitratos	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Estos carbonatos se originan a partir de varias fuentes o combinaciones de fuentes, ya sea en forma directamente en forma de carbonatos o por un mecanismo de solución-precipitación. Las fuentes más comunes y los mecanismos son: i) herencia del material madre; ii) disolución de minerales que contienen Ca; iii) mineralización de materiales vegetales; iv) deposición por acción del viento y lluvia; v) movimiento del agua superficial o subterránea.
	Calcita	CaCO_3	
Clase 9: Silicatos	Cloritas	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$	Puede comprender un grupo de minerales comúnmente de color verde que se presentan como masas terrosas de grano fino. Suele estar asociada a rocas metamórficas; en suelo se heredan de minerales primarios o se producen como alteraciones de otros minerales. Las cloritas que se encuentran en rocas sedimentarias se relacionan estrechamente con orígenes detríticos. Presenta baja estabilidad por lo que su presencia no es tan abundante.

Clasificación mineral según Strunz (10ª ed.)	Mineral	Fórmula química	Observaciones generales
	Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$	Es el resultado de la alteración o meteorización hídrica o térmica de moscovita y el feldespato. También, puede ser heredada de materiales primarios como calizas y una variedad de sedimentos aluviales. Se puede encontrar en suelos, rocas arcillosas sedimentarias, sedimentos y rocas metamórficas.
	Feldespatos	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{NH}_4)(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$	Los feldespatos se encuentran prácticamente en todos los sedimentos y suelos en cantidades que varían según la naturaleza del material original y la etapa de meteorización. La naturaleza de los feldespatos puede brindar información útil sobre el origen geológico del material original del suelo y sobre el grado y los procesos de formación del suelo; su meteorización es un importante proceso geoquímico de la superficie terrestre.

Fuente: elaboración propia con base en Dixon y Weed (1986) y John et al. (2003).

5.2.1 Caracterización mineralógica de los sedimentos con DRX

En términos generales, el análisis de DRX realizado a las 18 submuestras de sedimento, sugieren una asociación mineralógica en donde predominan minerales como la illita que se identificó por el espaciado 9,94 Å a 10,02 Å y el cuarzo identificado por un espaciado constante en 3,34 Å; seguido de la clorita (de 14,16 Å a 14,49 Å), la dolomita en 2,88 Å, los feldespatos en 2,30 Å y la calcita (de 3,02 Å a 3,03 Å). Aunque menos frecuente, en algunos testigos de sedimento se hace presente la pirita (de 2,70 Å a 2,71 Å). Es relevante mencionar que los diferentes minerales identificados exhiben una familia de picos que se ubican en posiciones e intensidades diferentes a lo largo del espectro que va de 0 a 51 en la posición 2Θ (Figs. 9-11).

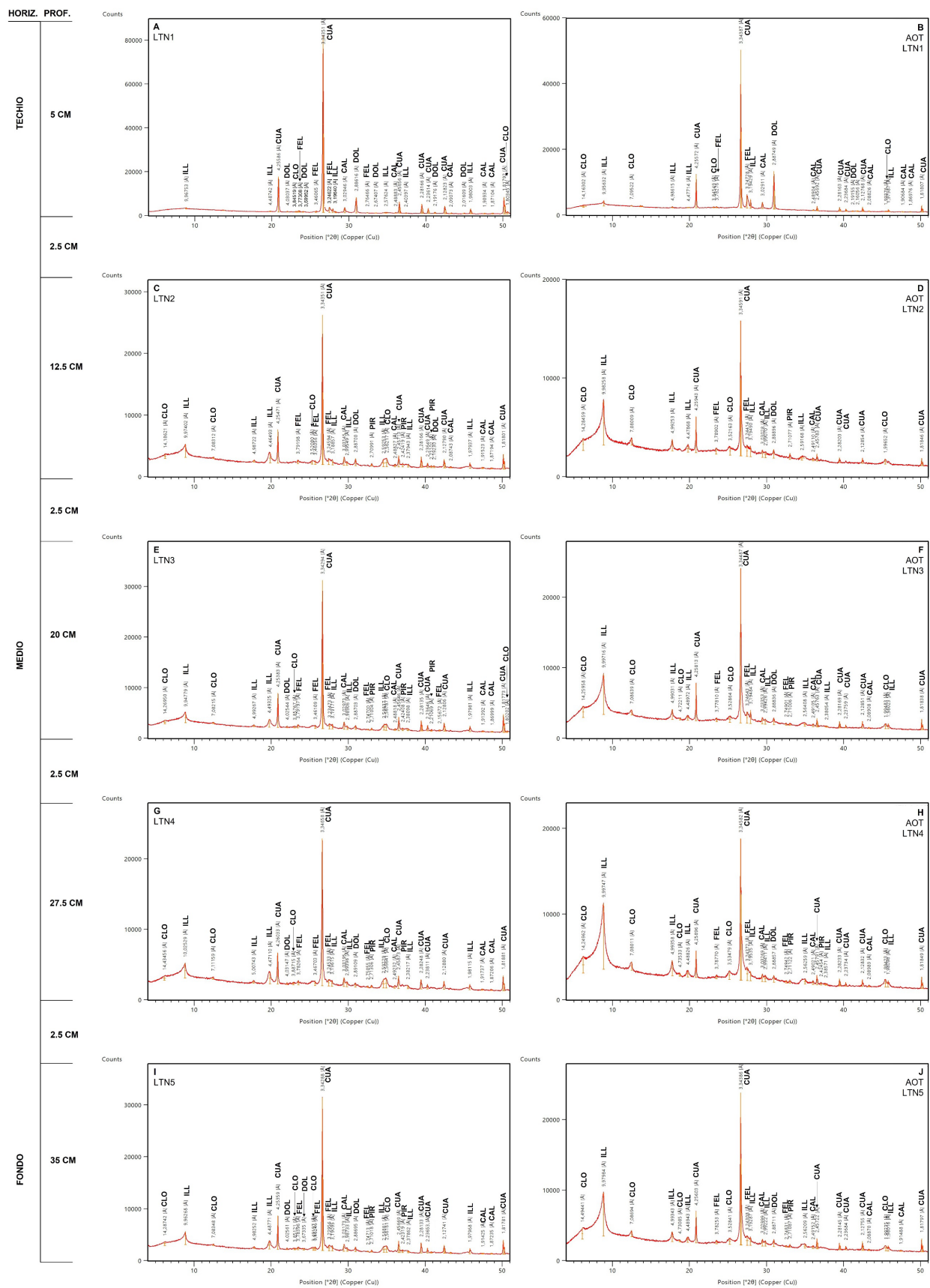


Figura 9. Difractogramas correspondientes a los testigos de sedimento colectados en el sitio LTN del Humedal La Laguna del Tranco. Del lado izquierdo, Figs. A, C, E, G e I corresponden a la DRX realizada a muestras de polvo. Del lado derecho, Figs. B, D, F, H y J corresponden a la DRX realizada a muestras de agregados orientados. El número de la muestra corresponde a un horizonte de profundidad, a mayor profundidad, mayor número. Abreviaturas: CLO (Clorita), ILL (Illita), CUA (Cuarzo), DOL (Dolomita), FEL (Feldespatos), CAL (Calcita), PIR (Pirita). Fuente: elaboración propia.

De manera particular, en los cuatro puntos de muestreo se observó una tendencia de acumulación de materiales minerales que se hace más evidente conforme se desciende a lo largo del horizonte vertical (con excepción del cuarzo, que disminuye). Los difractogramas de polvo del sitio LTN, correspondiente al borde norte del humedal (Fig. 9), son un ejemplo claro de lo anterior; se observa que la mineralogía general del techo comprendida entre los primeros 5cm exhibe picos ligeramente atenuados para la illita, la dolomita, los feldespatos, la calcita y la clorita (Fig. 9 A). A medida que el horizonte se hace más profundo, estos picos empiezan a observarse de manera más pronunciada y con ello las proporciones de la asociación cambian (Fig. 9 I).

En este mismo sentido, es posible relacionar y diferenciar las zonas que son más oxidantes (menos profundas) de las zonas más reductoras (más profundas) dentro del horizonte vertical en las muestras de sedimento. Para ejemplificar lo anterior, los difractogramas de polvo de las muestras LTS (Fig. 10), tomadas en el borde sur del humedal, permiten observar que a medida que se desciende en el horizonte vertical del testigo, la presencia y abundancia relativa del mineral pirita se hace más evidente. Si bien, la formación de pirita puede ocurrir en ambientes superficiales oxidantes, como se observaba en la muestra superficial del testigo LTC (Fig. 11 A), su formación ocurre en ambientes de estricta anoxia, en los que se producen procesos principalmente de sulfato-reducción por acción bacteriana (Merinero et al. 2010). Cabe destacar que para que estos procesos ocurran, el ambiente o medio debe estar provisto de materia orgánica que será transformada, liberando CO₂ metabólico que contribuirá en mayor o menor medida en la precipitación de otros minerales carbonatados como la dolomita y calcita (Sanz-Montero, et al. 2008).

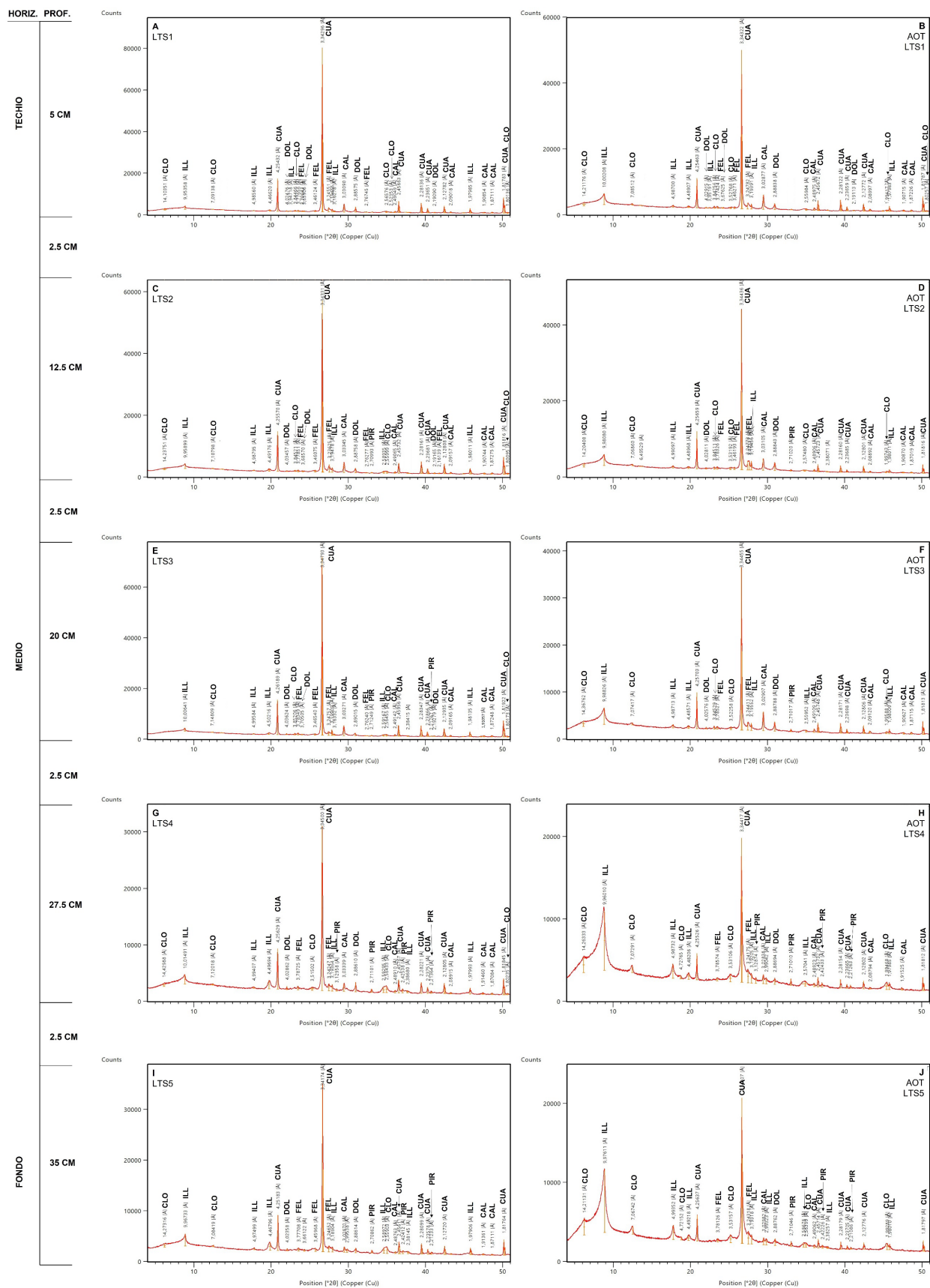


Figura 10. Difractogramas correspondientes a los testigos de sedimento colectados en el sitio LTS del Humedal La Laguna del Tranco. Del lado izquierdo, Figs. A, C, E, G e I corresponden a la DRX realizada a muestras de polvo. Del lado derecho, Figs. B, D, F, H y J corresponden a la DRX realizada a muestras de agregados orientados. El número de la muestra corresponde a un horizonte de profundidad, a mayor profundidad, mayor número. Abreviaturas: CLO (Clorita), ILL (Illita), CUA (Cuarzo), DOL (Dolomita), FEL (Feldespatos), CAL (Calcita), PIR (Pirita). Fuente: elaboración propia.

En lo que se refiere a la distribución horizontal de la composición mineralógica de los sedimentos estudiados, es posible afirmar que la superficie de fondo del Humedal La Laguna del Tranco se distribuyen en forma de una pequeña cuenca. Es decir, el centro del humedal (LTC) es el punto en donde se concentra la mayor proporción de los minerales que componen los sedimentos, mientras que los extremos norte (LTN) y sur (LTN), contienen la misma composición mineralógica pero, exhiben una proporciones menos abundantes en sus picos de absorción. Lo anterior, se puede observar en los difractogramas de polvo de las muestras LTC (Fig. 11), mismas que corresponde al testigo recolectado en el centro del humedal. Estos difractogramas, además, permiten observar con mejor claridad las familias de picos de absorción que acompañan a cada uno de los minerales que componen a la asociación identificada.

Respecto de los difractogramas de polvo de las muestras de LTD (Fig. 12), correspondientes a la surgencia más cercana al humedal, es posible identificar el mismo patrón vertical que exhiben las demás muestras del humedal. No obstante, en estas, se observa con mejor detalle que a medida que se hace más profundo el horizonte del testigo, la abundancia relativa del mineral cuarzo, disminuye drásticamente. Lo anterior, permite sostener que este mineral corresponde principalmente a elementos que se encuentran en la superficie del suelo y sedimentos del humedal, y que además, son producto de un residuo mineral (Dixon y Weed, 1986) que forma parte de las fracciones de arena y limo de La Laguna del Tranco; por lo que su mayor abundancia relativa se puede encontrar en las capas más superficiales de los testigos.

De manera particular, los difractogramas de agregados orientados (AOT) obtenidos en todas las muestras de sedimento del humedal (Figs. 9-12) exhibieron la misma composición mineralógica que los análisis de las muestras de polvo. Sin embargo, fue posible observar con mayor detalle los picos correspondientes a los minerales arcillosos de la clorita e illita. Específicamente, los picos de absorción (de 9,96 Å a 10,00 Å) del mineral illita fueron los que mejor definición exhibieron, mostrando bandas menos anchas que las exhibidas por el mineral clorita, que abarcaron un espaciado entre 14,16 Å y 14,49 Å. Lo anterior, permite sugerir la presencia de alguna o varias fases esmécticas o de interstratificados clorita/esmectita (García y Salan, 1979).

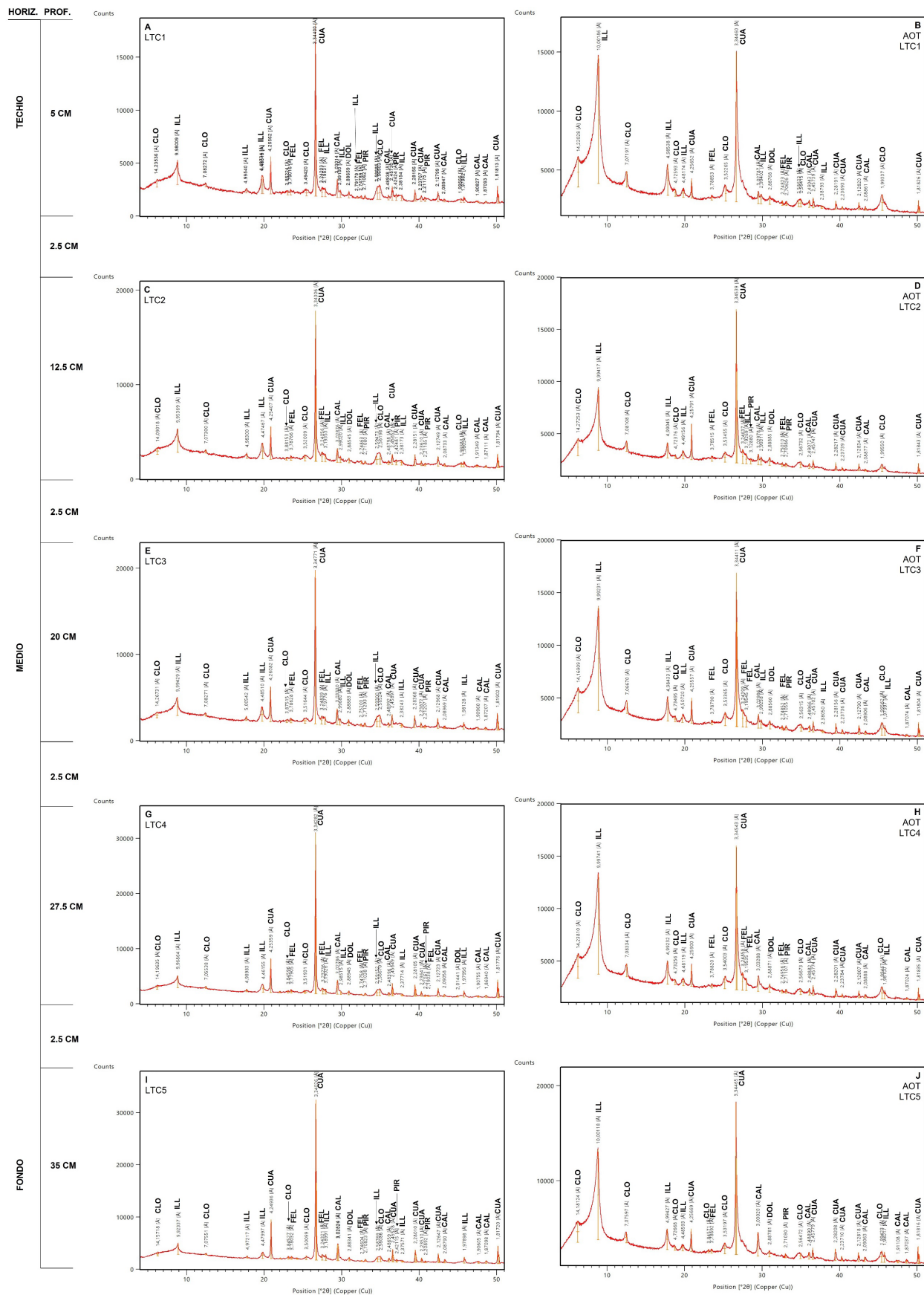


Figura 11. Difractogramas correspondientes a los testigos de sedimento colectados en el sitio LTC del Humedal La Laguna del Tranco. Del lado izquierdo, Figs. A, C, E, G e I corresponden a la DRX realizada a muestras de polvo. Del lado derecho, Figs. B, D, F, H y J corresponden a la DRX realizada a muestras de agregados orientados. El número de la muestra corresponde a un horizonte de profundidad, a mayor profundidad, mayor número. Abreviaturas: CLO (Clorita), ILL (Illita), CUA (Cuarzo), DOL (Dolomita), FEL (Feldespatos), CAL (Calcita), PIR (Pirita). Fuente: elaboración propia.

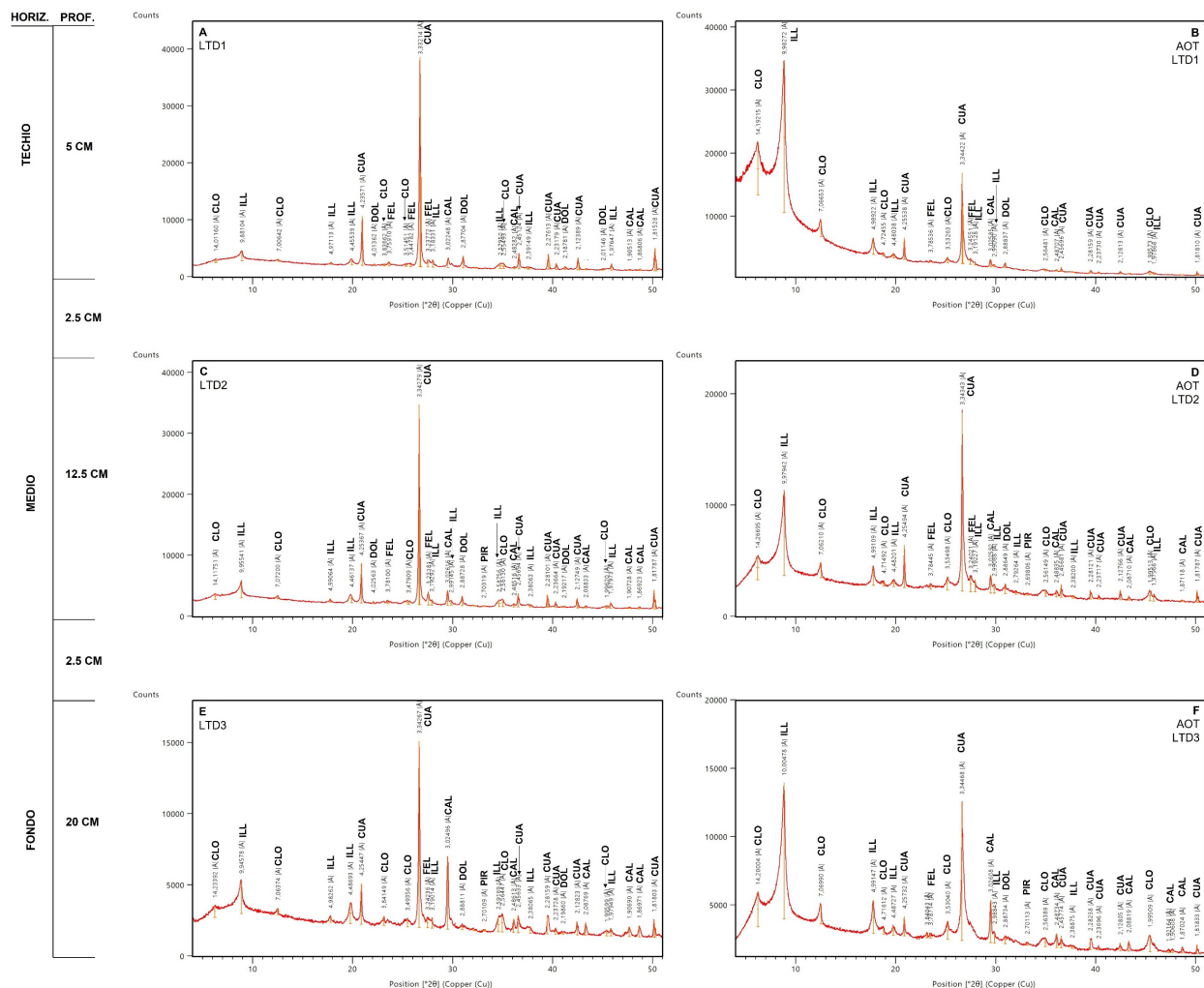


Figura 12. Difractogramas correspondientes a los testigos de sedimento colectados en el sitio LTD del Humedal La Laguna del Tranco. Del lado izquierdo, Figs. A, C, E, G e I corresponden a la DRX realizada a muestras de polvo. Del lado derecho, Figs. B, D, F, H y J corresponden a la DRX realizada a muestras de agregados orientados. El número de la muestra corresponde a un horizonte de profundidad, a mayor profundidad, mayor número. Abreviaturas: CLO (Clorita), ILL (Illita), CUA (Cuarzo), DOL (Dolomita), FEL (Feldespatos), CAL (Calcita), PIR (Pirita). Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Caracterización de los sedimentos con MEB

Conociendo que las composiciones minerales de las muestras de polvo y agregados orientados obtenidas mediante DRX para los diferentes testigos colectados en el humedal, son más o menos constantes horizontal y verticalmente, se procedió a su caracterización con MEB. Esta técnica se utilizó de manera complementaria para identificar la morfología y relaciones texturales que presentan los minerales de illita, cuarzo, calcita, dolomita, pirita y feldespatos identificados con DRX. Además, el uso de MEB permitió completar la identificación y caracterización de otros minerales como el yeso y cristales de rutilio que se encuentran presentes en la composición de los sedimentos superficiales del humedal pero que no fue posible identificarlos previamente.

En la Figura 13 y 14 se presentan las micrografías de MEB con las que se evaluaron estas características morfológicas y texturales para cada una de las muestras de sedimento superficial del humedal. En términos muy generales, la MEB exhibió que la matriz que conforma estos sedimentos corresponde predominantemente a laminas y conglomerados de minerales silicatados, entre los que destaca el cuarzo y los feldespatos. También, es posible identificar que estos sedimentos son ricos en arcillas (illita) frecuentemente mezcladas con restos vegetales alargados en los que los compuestos azufrados se vuelven predominantes (Fig. 13 B y C).

Particularmente, se identificó que los minerales con presencia de azufre (pirita) se encuentran asociados con materiales ricos en materia orgánica. Los microcristales y esférulas de pirita aparecen de manera aislada (Fig. 13 y 14 D) en tamaños que van de $<1\ \mu\text{m}$ a $5\ \mu\text{m}$; o bien, formando framboides subesféricos de microcristales equigranulares que van de $5\ \mu\text{m}$ (Fig. 14 A) a $15\ \mu\text{m}$ (Fig. 13 E). En algunos casos, estos microcristales (Fig. 13 C) o framboides (Fig. 13 E) están envueltos en laminas arcillosas de illita.

Por otro lado, las micrografías permitieron exhibir fracturas concoidales de superficie lisa o en ocasiones con presencia de estrías concéntricas que caracterizan a minerales como el cuarzo (Fig. 13 A). Asimismo, es posible observar formas irregulares en los cristales de este mineral (Fig. 13 B), aunque, en términos generales, la distribución de grano es más o menos homogénea. En cuanto al tamaño, se observa una distribución de partículas que abarcan una gama de tamaños que van desde $1\ \mu\text{m}$ hasta superiores a $80\ \mu\text{m}$ (Fig. 13 E).

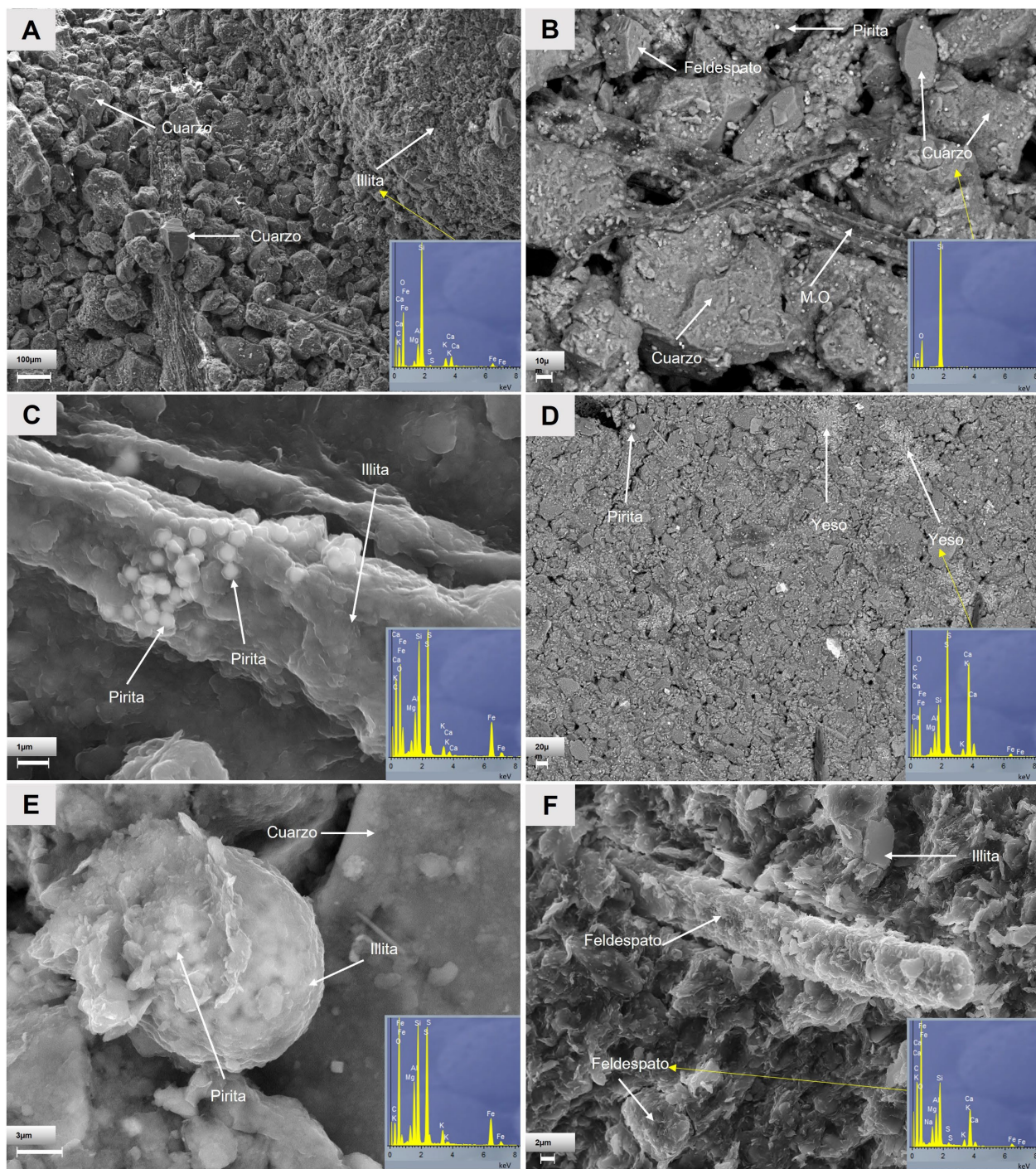


Figura 13. Fotomicrografías de MEB de tres muestras de sedimento superficial del Humedal La Laguna del Tranco. A-C) micrografías correspondientes a las muestras extraídas del sitio LTN1 en donde se observa una composición mineral de pirita, illita, cuarzo, feldespatos y materia orgánica; D-E) micrografías correspondientes a las muestras extraídas del sitio LTS1, es posible observar fracciones sueltas de yeso de tamaño variable y framboides de pirita cubiertos de illita; F) micrografías correspondientes a las muestras extraídas del sitio LTC1, donde se identifican estructuras laminares amorfas o dispuestas sobre una estructura alargada acompañada de minerales como la illita. Fuente: elaboración propia.

Los feldespatos observados en este estudio exhibieron formas de tamaño variable, con exfoliaciones particularmente más obvias que las del cuarzo; en ellas, se distinguen escisiones casi perfectas en alguno de los lados, mientras que en otro, se presentan una serie de estrías que sugieren procesos de fractura (Fig. 13 B). Por otro lado, se encontraron estructuras laminares correspondientes a este tipo de minerales, formando aglutinaciones amorfas o disponiéndose en estructuras alargadas, en donde se distinguen tamaños composicionales heterogéneos, acompañados de otros minerales como la illita (Figura 13 F). El análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) sugiere que este grupo de minerales silicatados consta de al menos cinco elementos químicos diferentes (K, Al, Si, O y Na), sin embargo, estos pueden estar acompañadas de otros elementos como el Mg y Fe.

Los minerales carbonatados como la calcita y la dolomita (Fig. 14 B) se encontraron en cantidades menos abundantes, su presencia en formaciones alargadas, fracturadas y altamente porosas sugiere que estos minerales fueron depositados por acción del viento y la lluvia. Una vez que estos entran en contacto con el agua del humedal el proceso de disolución se manifiesta en las cavidades porosas que presenta la calcita. Otro de los minerales que se encontró con menor abundancia y frecuencia fue el yeso. Las micrografías demuestran pequeñas aglomeraciones de microcristales irregulares y de diferente tamaño, orientadas al azar y de fácil erosión (Fig. 13 D).

El análisis de EDS demuestra que los microcristales del yeso se componen de Ca, S y O, aunque, no son necesariamente puros, ya que el espectro contiene señales de otros elementos propios de los minerales silicatados (Fig. 13 D). Aunque, debe advertirse que el yeso es uno de los minerales que exhibe alta capacidad de disolución en contacto con el agua (ver sección 5.1.3), por lo que su escasez puede estar vinculada a esta condición.

Por último, es preciso mencionar que en las micrografías obtenidas para el sitio LTD1 (Fig. 14 C) fue posible observar cristales prismáticos compuestos de óxido de titanio principalmente y con tamaños superiores a los 600 nm. Estos cristales se encontraron como elementos raros dentro de la matriz silicatada que compone la estructura mineralógica de los sedimentos de superficie del humedal. Su presencia en los sedimentos puede ser considerada como un elemento detrítico.

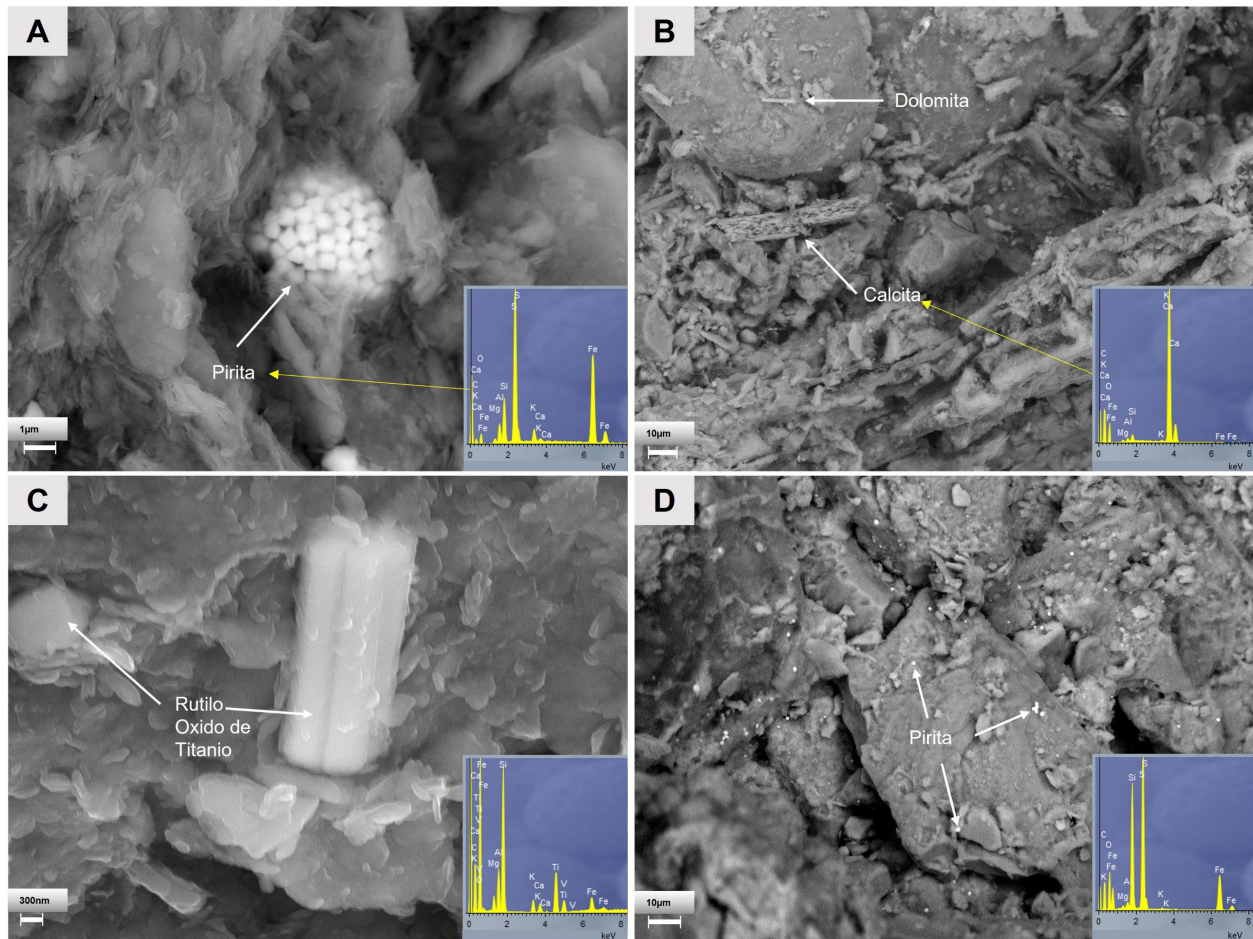


Figura 14. Fotomicrografías de MEB de dos muestras de sedimento superficial del Humedal La Laguna del Tranco. A) micrografías correspondientes a las muestras extraídas del sitio LTC1, se observa una estructura framboide de pirita; B-D) micrografías correspondientes a las muestras extraídas del sitio LTD1 que exhiben una composición de minerales carbonatados, pirita y óxidos de titanio sobre una matriz silicatada. Fuente: elaboración propia.

5.3 Identificación de las variables y ciclos biogeoquímicos que controlan las transformaciones minerales en el humedal

El origen y propiedades de los minerales que se forman, transforman o transportan hacia los sedimentos del Humedal La Laguna del Tranco, están vinculados con diversas interacciones entre los flujos del agua superficial/subterránea y las rocas de la superficie terrestre, así como de aquellas que forman los acuíferos sobre los que se ubica. Por ello, resulta necesario entender y conocer cuáles son las propiedades del agua, las del sedimento, las condiciones geológicas del área de estudio y la manera en cómo estas se relacionan en un ambiente que depende de factores bióticos y abióticos. La literatura científica hace referencia a estas relaciones dentro de un marco de auto-organización, de manera formal se refiere a ciclos biogeoquímicos que permiten

caracterizar los patrones sedimentarios que resultan de las retroalimentaciones físicas, químicas y biológicas entre sistemas múltiples (García et al. 2000).

Al respecto, es necesario destacar la geomorfología sobre la que se ubica La Laguna del Tranco, que como ya se mencionó, es un humedal pequeño que se asemeja en forma a una cuenca endorreica que emerge sobre materiales triásicos y jurásicos donde predominan los materiales carbonatados; con unidades litológicas en donde destacan los conglomerados, areniscas, calizas, yesos y arcillas. Además, este humedal se relaciona hidrológicamente con dos acuíferos de la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir y que, según los datos isotópicos, las aguas de este humedal son de origen meteórico, infiltradas aguas arriba entre los 1460 a 1480 msnm y descargadas a 950 msnm a través de diversos manantiales. Sobre estas consideraciones, es preciso indicar que, además de los aportes de agua superficial que obtiene el humedal, el tiempo en que el fluye el agua en el subsuelo e interacciona con la roca, también determinan la mineralización de estas aguas.

Dicho lo anterior, los procesos que controlan las transformaciones minerales en el humedal están relacionados con la geodinámica externa de la Tierra, que hace se produzcan diferentes procesos de transformación en las rocas y que implican una serie de etapas sucesivas por el contacto directo con la hidrósfera, la biósfera y la atmósfera (Elizalde, 2009). Una primera etapa, está delimitada por una secuencia de meteorización, en donde la “roca madre” está expuesta a la acción del agua y el viento, iniciando un proceso de disolución y arrastré de los minerales que conforman la roca madre. Luego, estos productos siguen caminos diversos dentro del ciclo hidrológico, específicamente en la fase de transporte de sedimentos cuenca abajo (Fig. 15), hasta llegar al Humedal La Laguna del Tranco.

Otra fase está definida por un ciclo de erosión-sedimentación (Fig. 15), en donde el transporte de materiales concluye cuando la energía de transporte disminuye. Lo anterior, da paso a la precipitación de los compuestos que conformaban el material inicial, o bien, nuevos compuestos insolubles en las condiciones finales (Schelesinger, 2000). Durante este ciclo, es posible diferenciar entre los siguientes procesos:

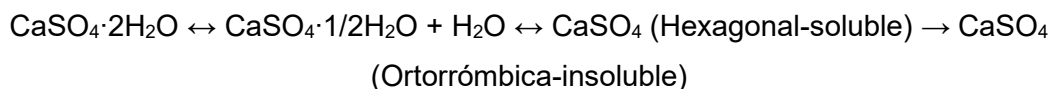
- a) **Disolución-carbonatación:** que hace referencia a la disociación de moléculas que componen la roca madre por acción del ácido carbónico (HCO_3^-) resultado de la interacción del CO_2 y el H_2O (Galán, 1991). En este estudio se puede tomar como ejemplo la disolución-carbonatación de minerales compuestos por carbonato cálcico (calcita,

dolomita y aragonito). Considerando que el CaCO_3 es el constituyente principal de estos minerales, la reacción de disolución-carbonatación sería la siguiente:



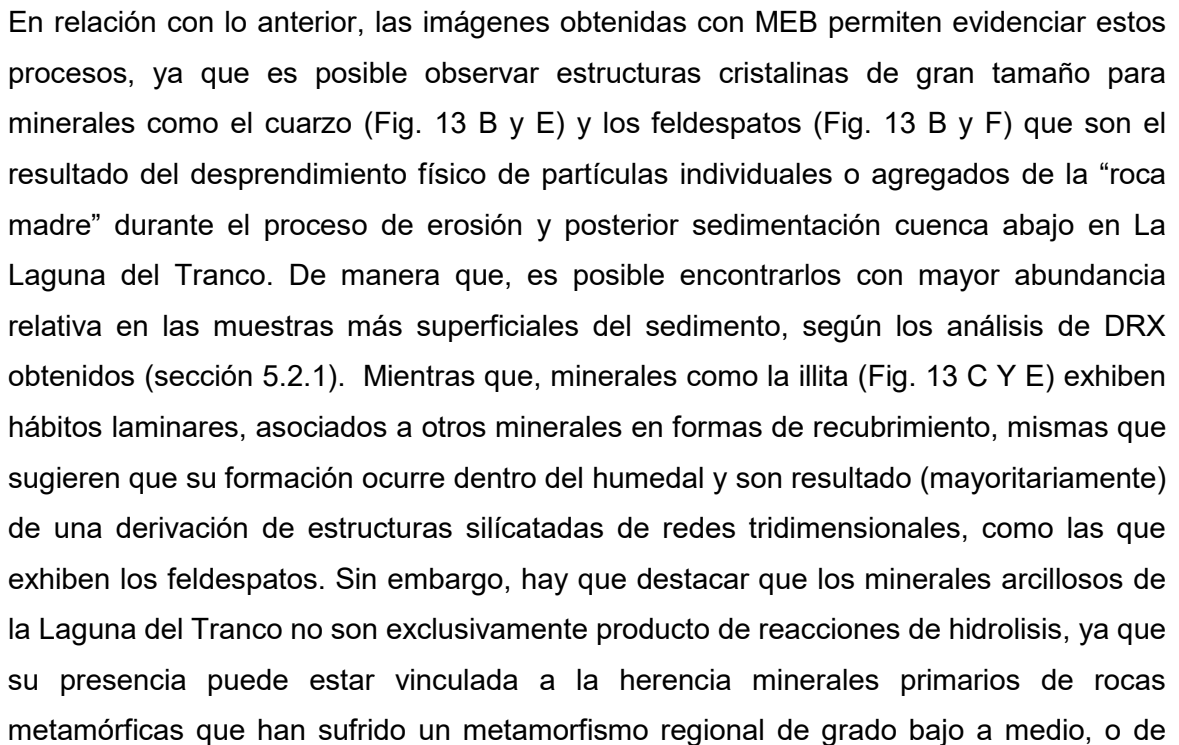
De acuerdo con Andreu et al. (2016), la presencia de CO_2 atmosférico en el agua, es el componente con mayor peso para acelerar estos procesos. La ruptura de la red cristalina de estos minerales y su consiguiente dispersión en el agua del humedal se manifiestan en las elevadas concentraciones del ion Ca^+ y anión HCO_3^- detectadas en los análisis de cromatografía de intercambio iónico realizadas (Tabla 3). Además, las imágenes de MEB permitieron evidenciar que este tipo de minerales presentan estructuras porosas en forma de conductos y cavidades que sugieren ser el resultado de estos procesos (Fig. 14 B). De manera que su baja abundancia relativa exhibida en los análisis de DRX (sección 5.2.1) resulta coherente.

- b) **Hidratación-Deshidratación:** ocurre cuando la roca madre es fragmentada por aumento o disminución en su volumen debido a la incorporación o eliminación de agua durante el proceso de cristalización (Pacheco y Portilla, 1991). Estos dos procesos se pueden resumir de la siguiente manera:



Particularmente, en este estudio, estos procesos están relacionados con minerales como el yeso y la anhidrita del humedal. La hidratación-deshidratación de estos minerales y su incorporación al agua del humedal se observa en las altas concentraciones encontradas para anión SO_4^{2-} , a las que se suman las del ion Ca^+ obtenidas mediante cromatografía de intercambio iónico (Tabla 3). Aunque fue posible observar mediante MEB microcristales del mineral yeso, estas, fueron mínimas y su tamaño de partícula $< 1 \mu\text{m}$, mismas que sugieren una alta capacidad de incorporación a las aguas del humedal (Fig. 13 D). Lo anterior, puede ser contrastado con los valores obtenidos en los índices de saturación tanto para el yeso como para la anhidrita (ver sección 5.1.3), en donde se comprueba que la concentración de los elementos que componen estos minerales no exceden su solubilidad y por lo tanto se ven limitados en su precipitación.

Sin embargo, la hidrólisis de los aluminosilicatos identificados mediante DRX (feldespatos y cuarzo), además de generar componentes solubles también forman aluminosilicatos hidratados muy poco solubles, que quedan como minerales secundarios (clorita e illita,) en los sedimentos (Mediavilla, 2014). Para ejemplificar lo anterior, a continuación se muestra el resultado de la hidrólisis de una ortoclasa, donde minerales del grupo de los feldespatos derivan en un mineral secundario (illita) del grupo de las arcillas:



rocas ígneas en las que los piroxenos, los anfíboles y la biotita se han alterado hidrotermalmente a clorita, por ejemplo (Dixon y Weed, 1986).

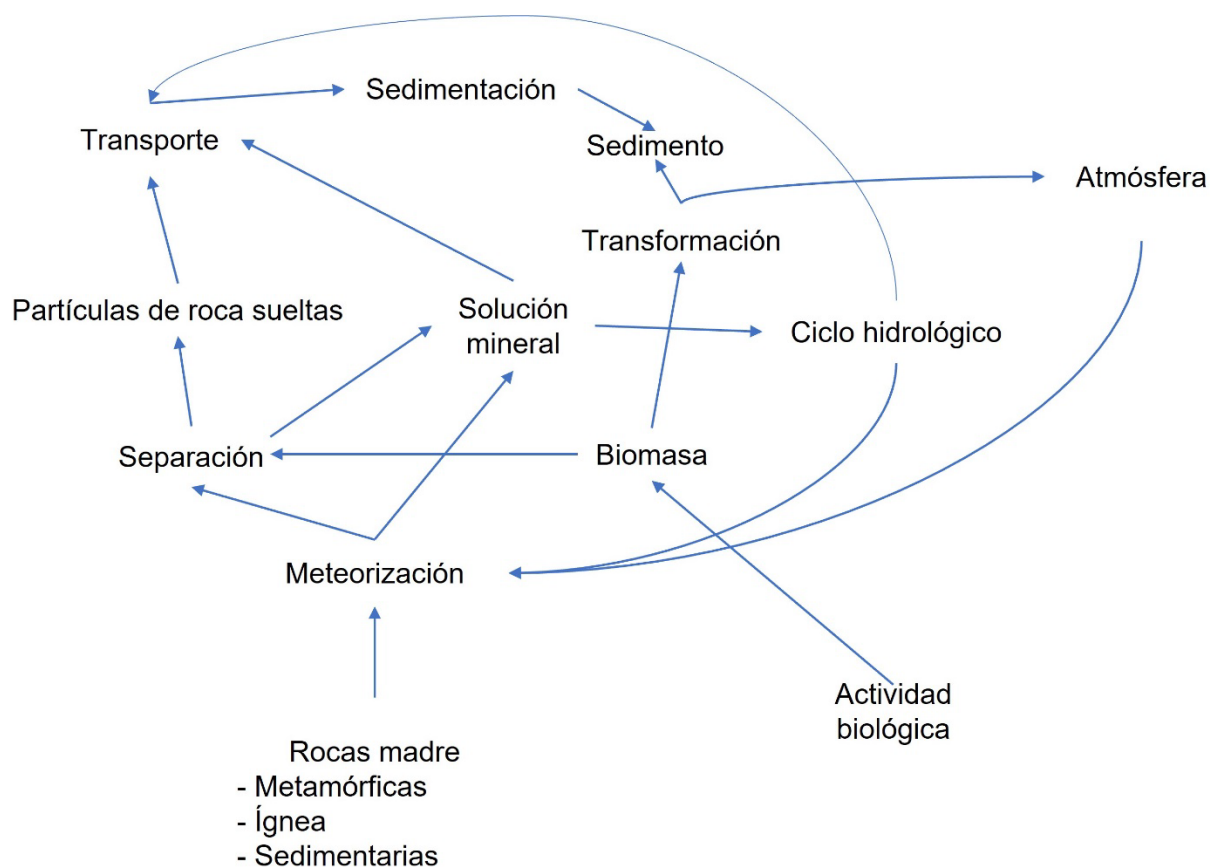


Figura 15. Visión general de los ciclos y procesos que ocurren sobre la fase geológica superficial de la tierra y que controlan las transformaciones minerales en el Humedal La Laguna del Tranco. Fuente: adaptado de Elizalde (2009).

Otra vía por la que se han formado nuevos compuestos minerales a partir de las sustancias disueltas en las aguas del humedal es mediante la captación y transformación de estas a través del metabolismo de los microorganismos vivos, particularmente el de las bacterias (Fig. 15). En este sentido, los análisis de DRX y MEB, permitieron identificar pirita, un mineral que en su fase del proceso de meteorización ocupa sulfato ácido (Fig. 16). De manera particular, este proceso se vincula con reacciones redox mediadas por bacterias en donde se involucran compuestos azufrados que controlan procesos sedimentarios autigénicos (Cifuentes et al., 2020).

Varios elementos son necesarios para que se lleve a cabo la fase de reducción del sulfato ácido, entre los que se encuentra una fuente de Fe^{3+} y SO_4^{2-} , un potencial redox alrededor de -400 mV ,

bacterias reductoras de SO_4^{2-} , una fuente de energía para los microorganismos (materia orgánica) y un mecanismo para eliminar HCO_3^- formado en el proceso (Dixon y Weed, 1986). La materia orgánica y los microorganismos no solo son necesarios para este proceso, sino que influyen fuertemente en la distribución de sulfuros en diferentes horizontes del sedimento (vertical y horizontal), ya que como se observó en las micrografías y abundancias relativas del DRX, la pirita está fuertemente asociada a restos vegetales y aunque se puede encontrar sobre las capas más superficiales del sedimento, su abundancia se ve favorecida en las capas inferiores del horizonte vertical, en donde el intercambio de oxígeno es menos abundante. De modo que las bacterias se concentran en la materia orgánica y el H_2S (o HS^-) liberado por los microorganismos se precipita en el medio, formando microcristales aislados o agregados (framboides) (Fig. 14 A) (Quevedo et al., 2021). La composición de las aguas sulfatadas cálcicas del humedal juegan un papel clave en la conformación de estos minerales sulfatados, ya que son la fuente principal del anión SO_4^{2-} , mientras que arcillas como la clorita e illita son las principales fuentes de Fe^{3+} .

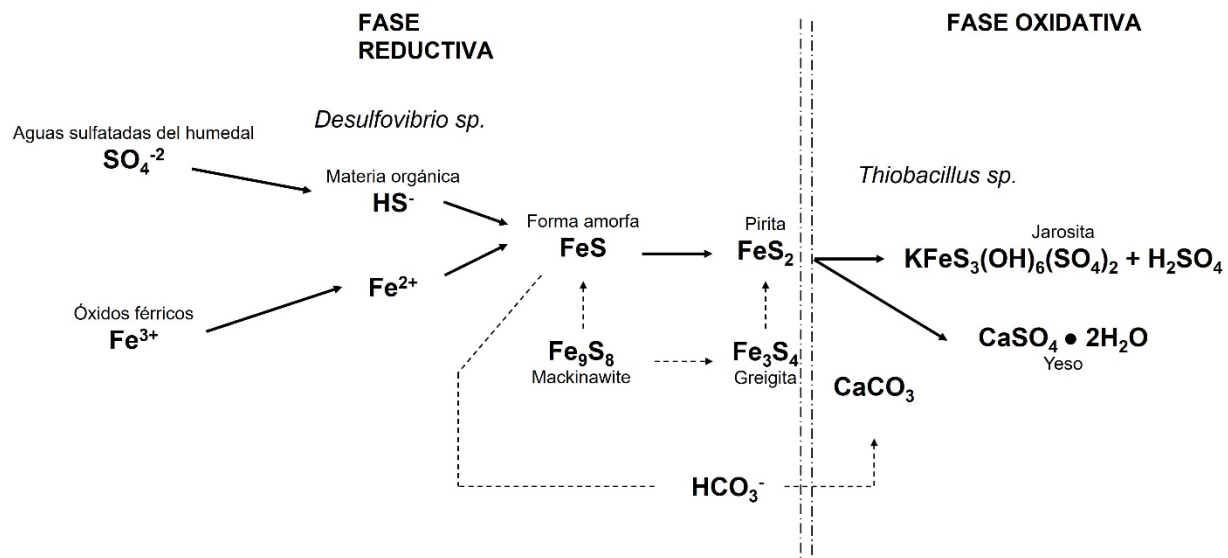


Figura 16. Diagrama esquemático de las transformaciones minerales para formar pirita y yeso. Fuente: modificado de Dixon y Weed (1986).

6. Conclusiones

En este estudio se presentó una primera aproximación a la caracterización mineralógica, hidrogeoquímica e interacción agua-roca del Humedal La Laguna del Tranco, ubicado en el municipio de Hornos, Jaén. Esta caracterización se abordó desde un marco físico, químico e hidrogeológico, siguiendo técnicas de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, cromatografía iónica, medidas *in situ* de parámetros fisicoquímicos del agua, difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido. Los principales hallazgos incluyen:

En primer lugar, que La Laguna del Tranco es un humedal pequeño en forma de cuenca endorreica; coincide sobre materiales triásicos y jurásicos donde afloran materiales carbonatados, principalmente. Las unidades litológicas sobre las que se ubican corresponden a conglomerados, areniscas, calizas, yesos y arcillas. Es un Humedal que se ubica sobre dos acuíferos que coinciden con la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir.

En segundo lugar, se identificó que el origen de sus aguas son meteóricas, infiltradas y descargadas sobre la misma cueca mediante diversos afloramientos gracias a las propiedades hidráulicas del suelo. Se encontró que son aguas duras, con tendencia neutra, aunque con una gran cantidad de iones disueltos. Específicamente, las aguas del humedal corresponden a una mezcla de facies cloruradas sódicas y sulfatadas cálcicas. Además, se identificó que de las especies minerales analizadas, solo el aragonito y la calcita muestran una ligera capacidad de precipitación. Por el contrario, minerales como la anhidrita, dolomita, yeso y halita tienden a disolverse.

Estas aguas están enriquecidas con una gama amplia de metales pesados y minoritarios pero, estos no rebasan los límites permisibles para el consumo humano. Tanto física como químicamente, estas aguas indican que podrían ser aptas para su consumo. Sin embargo, hacen falta estudios para determinar sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales y análisis microbiológicos para indicar con certeza su potabilidad.

En tercer lugar, se encontró que los materiales sedimentarios del humedal no son consolidados; provienen de diversos procesos que incluyen meteorización, erosión-sedimentación y ciclos biogeoquímicos. Las especies minerales que componen estos sedimentos son pirita, cuarzo, dolomita, calcita, cloritas illita y feldespatos. La distribución y abundancia de estos exhiben patrones verticales y horizontales. Por un lado, minerales como el cuarzo son más abundantes en la superficie de los sedimentos, mientras que otros, como la pirita son más abundantes en la

base. Por otro lado, se identificó que en el centro del humedal se encuentra la mayor concentración y abundancia de la composición mineral identificada.

La matriz que conforma estos sedimentos corresponde predominantemente a laminas y conglomerados de minerales silicatados, entre los que destaca el cuarzo y los feldespatos. También, es posible identificar que estos sedimentos son ricos en arcillas (illita) frecuentemente mezcladas con restos vegetales alargados en los que los compuestos azufrados se vuelven predominantes (pirita).

En cuarto lugar, se identificó que los procesos que controlan las transformaciones minerales en el humedal inician desde diferentes momentos, aunque los agentes principales que inician estos procesos son el agua, el viento y los microorganismos vivos. Algunos de los procesos identificados se relaciona con la disolución-carbonatación de la calcita, dolomita y aragonito; hidratación-deshidratación de minerales como el yeso y la anhidrita; e hidrólisis de los compuestos silicatados (cuarzo, feldespatos e illita). También se identificó como otra vía de formación de nuevos compuestos minerales, la captación y transformación de sustancias disueltas en las aguas del humedal que son incorporadas en los procesos metabólicos de la actividad bacteriana, como es el caso de la reducción del sulfato ácido que forma pirita.

Es necesario resaltar que las condiciones fisicoquímicas del agua, las transformaciones minerales que ocurren dentro del humedal, los procesos de meteorización y erosión-sedimentación, así como los ciclos bioquímicos vinculados a La Laguna del Tranco, son solo una impresión temporal y espacial de los procesos que ahí ocurren. Es decir, las condiciones que se reportan en este estudio no son necesariamente constantes y mucho menos estables en el tiempo, ya que como se demostró, los minerales que componen las aguas de este humedal y sus sedimentos dependen de diversos factores, controlados por una gama amplia de factores bióticos y abióticos. Aunado a lo anterior, existen factores antropogénicos que pueden influir de manera directa sobre estos procesos y dinámicas del hábitat, alterando indudablemente los ciclos naturales del humedal.

Por lo anterior, las acciones de monitoreo y vigilancia ambiental a largo plazo resultan una herramienta relevante en la obtención de información acerca de las condiciones particulares en las que se desarrollan estos procesos en este tipo de hábitat. Específicamente, la caracterización mineralógica, hidrogeoquímica y la identificación de las interacciones agua-roca de este tipo de hábitat permiten desarrollar indicadores ambientales para evaluar las condiciones actuales y el establecimiento de una línea base para su seguimiento. Además, a partir de este tipo de estudios

es posible sostener que pese a la pequeña área que ocupa este humedal sigue cumpliendo con servicios ecosistémicos propios del hábitat. Evidencia de lo anterior es su capacidad para retener diferentes tipos de minerales, transportarlos, transformarlo e incorporarlos a la biomasa de los microorganismos; también, es posible observar su capacidad de captar materia orgánica y por lo tanto fungir como sumidero de carbono, por mencionar algunos ejemplos.

7. Referencias

Agencia Europea de Medio Ambiente. (2009). *Cambio climático y adaptación de los recursos hídricos*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, España.

Alcántara, J., Fernández, S. Alejo, I. Alfonso, I. y Villas, F. (2000). Caracterización mineralógica e identificación de las áreas fuentes de los sedimentos actuales del Istmo de Jandía (Fuerteventura). *Geogaceta*, 27, 199-202.

Alshemmari, H., Al-Dousari, A., Talebi, L. y Al-Ghadban. (2013). Mineralogical characteristics of surface sediment in Sulaibikhat Bay, Kuwait. *Kwait Journal of Science*, 40(2), 159-176.

Amić, A. y Tadić, L. (2018). Analysis of basic physical-chemical parameters, nutrients and heavy metals content in Surface water of small catchment area of Karašica and Vučica Rivers in Croatia. *Environments*, 5(18), 20. DOI: 10.3390/environments5020020

Andreo, B., Gil, J. M., Mudarra, M., Linares, L. y Carrasco, F. (2016). Hypothesis on the hydrogeological context of wetland areas and springs related to evaporitic karst aquifers (Málaga, Córdoba and Jaén provinces, Southern Spain). *Environmental Earth Sciences*, 75, 759. DOI: 10.1007/s12665-016-5545-1

Andreu, J. M., Calaforra, J. M., Cañaveras, J. C. Cuezva, S., Durán, J. J., Garay, P., García, M., García-Cortés, Á., Gázquez, F., Ordóñez, S. y Sánchez, S. (2016). Karst: un concepto muy diverso. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, (24.1), 6-20.

Appelo, C. A. J., y Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands a member of Taylor & Francis Group plc.

Arias, J. y Gómez, J. (2015). La planificación y gestión de los humedales de Andalucía en el marco del convenio Ramsar. *Investigaciones Geográficas*, (63), 117-129.

Avramidis, P., Samiotis, A., Kalimani, E., Papoulis, D., Lampropoulou, P. y Bekiari, V. (2013). Sediment characteristics and water physicochemical parameters of the Lysimachia Lake, Western Greece. *Environmental Earth Science*, 70, 383–392. DOI: 10.1007/s12665-012-2134-9

Ba, J. Gao, F., Peng, C. y Li, J. (2022). Characteristics of nitrate and heavy metals pollution in Huixian Wetland and its health risk assessment. *Alexandria Engineering Journal*, 61(11), 9031-9042. DOI: 10.1016/j.aej.2022.02.045

Baeza, J., López, J. A. y Ramírez, A. (Eds.). (2001). *Las aguas minerales en España*. Instituto Geológico y Minero de España.

Baeza, J., Rubio, J. C. y Luque, J. A. (Eds.). (2003). *Las aguas minerales, minero-medicinales y termales en la provincia de Jaén*. Instituto Geológico y Minero de España.

Bao, F., Pott, A. y Villa, P. M. (2022). Abiotic drivers shape seed inputs and outputs in a tropical wetland on *Croton trinitatis* population. *Ecological Processes*, 11(1), 9. DOI: 10.1186/s13717-021-00353-x

Barik, S., Saha, G. K. y Mazumdar, S. (2022). Influence of land cover features on avian community and potential conservation priority areas for biodiversity at a Ramsar site in India. *Ecological Processes*, 11(1), 25. DOI: 10.1186/s13717-022-00369-x

Bastida, J., Osácar, M., Muñoz, A. y Sancho, C. (2010). Caracterización mineralógicas de los sedimentos aluviales holocenos del Barranco Grande (Bardenas Reales de Navarra). *Geogaceta*, 48, 167-170.

Bernués, M. (2011). Estado de conservación de los humedales españoles en los albores del siglo XXI. En Viñals, M. J., Basco, D. y Morant, M. (Eds.), *Los humedales mediterráneos: el contexto ambiental y social. Reflexiones para su estudio y gestión eficaz* (pp. 105-118). Fundación Biodiversidad y Universitat Politècnica de València.

Bianchini, G., Laviano, R., Lovo, S. y Vaccaro. (2002). Chemical–mineralogical characterisation of clay sediments around Ferrara (Italy): a tool for an environmental analysis. *Applied Clay Science*, 21(3–4), 165-176. DOI: 10.1016/S0169-1317(01)00086-2

Bunaciu A. A., Udristoiu, E. y Aboul, H. (2015). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289-299. DOI: 10.1080/10408347.2014.949616

Camacho, A. (2008). La gestión y protección de humedales en la política de aguas en España. En, del Moral, L. y Hernández, N (Eds.), *Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas*. Fundación Nueva Cultura del Agua, Universidad de Sevilla y Ministerio de Medio Ambiente.

Camur, M. z., Yazicigil, H. y Altinbilek, D. H. (1997). Hydrogeochemical modeling of waters in Mogan and Eymir Lakes special environmental protection area, Ankara, Turkey. *Water Environmental Research*, 69(6), 1144-1153. DOI: 10.2175/106143097X125894

Cantú, F.G., Ventura-Houle, R., Heyer Rodríguez, L., Requena, G., Guevara, O. y Neri, E. (2021). Water–rock interactions in a karst aquifer located in southwestern Tamaulipas, Mexico. *Carbonates and Evaporites*, 36, 59. DOI: 10.1007/s13146-021-00723-8

Cao, X., Wu, P., Han, Z., Zhang, S. y Tu., H. (2016). Sources, Spatial Distribution, and Seasonal Variation of Major Ions in the Caohai Wetland Catchment, Southwest China. *Wetlands*, 36(6), 1069-1085. DOI: 10.1007/s13157-016-0822-z

Centro de Instrumentación de Apoyo a la Investigación Técnica [CICT]. (02 de mayo de 2022a). *AQ06-Espectrómetro ICP-masas 2*. <https://www.ujaen.es/servicios/scai/recursos/aq06-espectrometro-icp-masas-2>

Centro de Instrumentación de Apoyo a la Investigación Técnica [CICT]. (13 de mayo de 2022b). *ME03- Microscopio electrónico de barrido 2*. <https://www.ujaen.es/servicios/scai/recursos/me03-microscopio-electronico-de-barrido-2>

Chen, M. y Liu, J. (2015). Historical trends of wetland areas in the agriculture and pasture interlaced zone: A case study of the Huangqihai Lake Basin in northern China. *Ecological Modelling*, 318, 168-176. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.12.012

Choi, B. Y., Yun, S.T., Kim, K.H., Kim, J.W., Kim, H. M. y Koh, Y. K. (2014). Hydrogeochemical interpretation of South Korean groundwater monitoring data using Self-Organizing Maps. *Journal of Geochemical Exploration*, 137, 73-84.

Cifuentes, G., Jiménez-Millán, J., Quevedo, C. y Jiménez-Espinosa, R. (2020). Transformation of S-bearing minerals in organic matter-rich sediments from a saline lake with hydrothermal inputs. *Minerals*, 10(6), 525. DOI: 10.3390/min10060525

Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702–1703.

Cusimano, G., Hauser, S. y Vassallo, M. (2006). *Hydrogeochemistry of a wetland area of southwestern Sicily (Italy)*. Official Publication of the European Water Association (EWA).

Díaz, I. A., Sedas, E. E. y Burguillo, M. (Coords.). (2018). *Servicios ecosistémicos en humedales*. Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Veracruz y GM-Espejo Imagen S.A. de C.V.

Diputación de Jaén. (2 de mayo de 2022). *Estudio de sostenibilidad Hornos de Segura*. <http://www.agenda21jaen.com/red-de-municipios-sostenibles/municipios/Hornos-de-Segura/documentos/diagnosis-tecnica.html>

Dugan, P. (1992). *Conservación de Humedales. Un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias*. Unión Mundial para la Naturaleza [UICN].

Duque, G. (2020). Intemperismo o meteorización. En Duque, G., *Manual de geología para ingenieros* (207-232). Universidad Nacional de Colombia.

Elizalde, G. (2009). El suelo en la fase superficial del ciclo geológico. *Geoenseñanzas*, 14(2), 265-292.

Ellis, A. J y Mahon. (1964). Natural hydrothermal systems and experimental hot/water/rock interactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(8), 1323-1357. DOI: 10.1016/0016-7037(64)90132-2

Ensing, S. H., Noe, G., Hupp, C. y Skalak, K. (2015). Head-of-tide bottleneck of particulate material transport from watersheds to estuaries. *Geophysical Research Letters*, 42(24), 10671-10679. DOI: 10.1002/2015GL066830

Faz, A., Moreno, J. y Rosales, R. M. (2013). Intensificación tecnologías industriales. En Gómez, M. (Coord.), *Programa educativo "rutas biotecnológicas"* (1ª ed.). Región de Murcia. http://ftp.murciaeduca.es/programas_educativos/Nuevo1/LIBROETSIA/index.html

Fernández, J. I., Rejas, M., Rodríguez, A. y Lobo, A. (2016). Caracterización geoquímica de los sedimentos de la red de drenaje de Río Garona en la Val d'Aran (Catalunya, España). *Geo-Temas*, 16(1), 539-542.

Frink, C. R. (1969). Chemical and mineralogical characteristics of eutrophic lake sediments. *Soil Science Society of America Journal*, 33(3), 369. doi:10.2136/sssaj1969.03615995003300030012x

Galan, C. (1991). Disolución y génesis del karts en rocas carbonáticas y rocas silíceas: un estudio comparado. *MUNIBE (Ciencias Naturales- Natur Zientziak)*, (43), 43-72.

Gao, S., Li, C., Jia, C., Zhang, H., Lv, M., Sun, B., Chen, H., Gang, S. y Meng, F. (2021). Hydrochemical and stable isotope ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) characteristics and hydrogeochemical processes in the Baotu Spring Basin, Eastern China. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2084. DOI: 10.1007/s12517-021-08410-7

Gao, S., Li, C., Jia, C., Zhang, H., Lv, M., Sun, B., Chen, H., Gang, S. y Meng, F. (2021). Hydrochemical and stable isotope ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) characteristics and hydrogeochemical

processes in the Baotu Spring Basin, Eastern China. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2084. DOI: 10.1007/s12517-021-08410-7

Garcia, M. y Salan, J. (1979). Mesofases de la materia: los cristales líquidos. *El basilisco*, (7), 46-52.

García, T., Velo, A., Fernández-Bastero, S., Alejo, I., Gago, I., Santos, A. y Vilas, F. (2000). Interacciones reacción-transporte en sedimentos mixtos silicilástico-carbonatados de la Ría de Vigo y bahía de Baiona. *Journal of Iberian Geology*, 26, 249-269.

Gascoyne, M. (2004). Hydrogeochemistry, groundwater ages and sources of salts in a granitic batholith on the Canadian Shield, southeastern Manitoba. *Applied Geochemistry*, 19(4), 519-560. DOI: 10.1016/S0883-2927(03)00155-0

Gil, J. M. (2018). *Caracterización hidrológica de humedales y manantiales salinos asociados a acuíferos kársticos evaporíticos del sector central del Subbético* [Tesis de doctorado, Universidad de Granada]. <http://hdl.handle.net/10481/52349>

Gil, J. M., Barberá, J. A., Andreo, B. y Mudarra, M. (2017). Geochemical Evolution of Groundwater in an Evaporite Karst System: Brujuelo Area (Jaén, S Spain). *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 336-339. DOI: 10.1016/j.proeps.2016.12.085

Gil, J. M., Barberá, J. A., Andreo, B. y Mudarra, M. (16-21 de octubre de 2016). Geochemical evolution of groundwater in an evaporite karst system: Brujuelo area (Jaén, S Spain). *15th Water-Rock Interaction International Symposium, WRI-15*.

González, A., Rubio, J. C. y López, J. A. (Eds.). (2006). *El agua subterránea en el Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas (Jaén)*. Instituto Geológico y Minero de España.

Graf, P., Wernli, H., Pfahl, S. y Sodemann, H. (2019). A new interpretative framework for below-cloud effects on stable water isotopes in vapour and rain. *Atmospheric, Chemistry and Physics*, 19, 747-765. DOI: 10.5194/acp-19-747-2019

Grasvy, S., Hutcheon, I. y Krouse, H. R. (2000). The influence of water-rock interaction on the chemistry of thermal springs in western Canada. *Applied Geochemistry*, 15(4), 439-454. DOI: 10.1016/S0883-2927(99)00066-9

Guo, X., Zuo, R., Wang, J., Meng, L., Teng, Y., Shi, R., Gao, X. y Ding, F. (2019). Hydrogeochemical Evolution of Interaction Between Surface Water and Groundwater Affected by Exploitation. *Groundwater*, 57(3), 430-442. DOI: 10.1111/gwat.12805

Harris, W. y White, G. (2008). X-ray diffraction techniques for soil mineral identification. En Ulery, A. y Drees, R. (Eds), *Methods of soil analysis part 5-mineralogical methods* (pp. 81-116). Soil Science Society of America, Inc.

He, S., Goodkin, N. F., Kurita, N., Wang, X. y Rubin, C. M. (2018). Stable isotopes of precipitation during tropical Sumatra Squalls in Singapore. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 3812–3829. DOI: 10.1002/2017JD027829

Hernández P. (2016). Hidrogeología e hidrogeoquímica en zonas de fallas del sector oriental de la cordillera bética. Evaluación del riesgo sísmico. [Tesis de doctorado, Universidad de Jaén]. <https://hdl.handle.net/10953/763>

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2022). *Datos espaciales de referencia de Andalucía (DERA)*. Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades. Recuperado el 12 de abril de 2022 de <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/index.htm>

Instituto Geológico y Minero de España [IGME] y EPTISA. (1985). *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. IGME Y EPTISA. <https://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/lib43.htm>

Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE). (1998). *Atlas hidrogeológico de Andalucía*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía y Consejería de Trabajo e Industria de la Junta de Andalucía. https://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro110/lib110.htm

Instituto Tecnológico Geominero de España [ITGE]. (1997). *Atlas hidrogeológico de la provincia de Jaén*. SOPROARGRA. <https://aguas.igme.es/igme/publica/libro76/lib76.htm>

Instituto Tecnológico Geominero de España [ITGM] (Ed.). (2000). *Unidades hidrogeológicas de España: mapas y datos básicos*. Instituto Tecnológico Geominero de España.

Ipohorski, M. y Bozzano, P. (2013). Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e Investigación*, 63(3), 43-53.

Irabien, M. J. y Velasco, F. (1990). Caracterización mineralógica de los sedimentos actuales del Río Nervión (Vizcaya). *Geogaceta*, 8, 104-106.

Jiménez, J. y Custodio, E. (2008). El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área circum-mediterránea y en la costa mediterránea española. *Boletín Geológico y Minero*, 119(1), 21-32.

Jiménez, R. y Jiménez, J. (julio 2010). Hydrochemical characterization of groundwater in the Guadalquivir River aquifer in western Jaén: application of geostatistical techniques. *IAHS publications*, 338, 102-103.

Kelly, D. (2005). Seawater intrusion topic paper (final). *Island County: WRIA*, 6, 1-30.

Kravitz, J. (1976). Textural and mineralogical characteristics of the surficial sediments of Kane Basin. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46(3), 710-725.

Lasaga, A. (1984). Chemical kinetics of water-rock interactions. *Journal of Geophysical Research*, 89(B6), 4009-4025. DOI: 10.1029/JB089iB06p04009

Last, W.M. (2002). Mineralogical Analysis of Lake Sediments. En W.M., Last y J.P., Smol (Eds), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research* (143-187). Springer y Dordrecht.

Li, W. y He. S. (2018). The conservation and management of plateau wetlands in Yunnan Province, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 208(1), 012108. 10.1088/1755-1315/208/1/012108

Liu, C., Wang, Y., Ma, X., Cui, D., Han, B., Xue, D. y Han, L. (2022). Traditional agricultural management of Kam Sweet Rice (*Oryza sativa* L.) in southeast Guizhou Province, China. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 18(1), 30. DOI: 10.1186/s13002-022-00528-6

Liu, C., Zhang, G. Y Wang, W. (2021). Characteristics of an open karst water system in Shandong Province, China. *Environmental Earth Sciences* 80, 147. DOI: 10.1007/s12665-021-09465-1

Lope, A. (2018). *Caracterización del medio físico, con énfasis hidrometeorológico, de los acuíferos carbonáticos en la Sierra de Segura (Provincia de Jaén)* [Tesis de máster, Universidad de Málaga]

Lope, A., Jiménez, R., y Jiménez, J. (24-27 de octubre de 2018). Caracterización preliminar de las propiedades hidroquímicas y mineralógicas y de procesos de interacción agua-roca en el acuífero de Navalperal, Sierra de Segura: un ejemplo de acuífero colgado en condiciones poco antropizadas. *Club del Agua Subterránea SIGA*, 659-667.

Lope, A., Martín, J. F. Mudarra, M., Barberá, J. A., Andreo, B., Jiménez, R. y Durán, J. J. (21-22 de febrero de 2019). Primeros resultados del seguimiento en continuo de las respuestas naturales de los acuíferos kársticos de las sierras de Segura, Castril y Seca (Provincias de Jaén y Granada). *Congreso Nacional del Agua Orihuela Innovación y Sostenibilidad*.

López, J. A. y Fornés, J. M. (Eds.). (2013). *100 años de hidrogeología en España (1900-2000)*. Instituto Geológico y Minero de España.

López, J. A., Rubio, J. C. y Martín, M. (Eds.). (2008). *Agua y cultura: VII Simposio del agua en Andalucía: 2 (Hidrogeología y aguas subterráneas)*. Instituto Geológico y Minero de España.

López, M. (19 de septiembre de 2011). *La Laguna*. Conoce tus fuentes. Recuperado el 19 de abril de 2022 de http://www.conocetusfuentes.com/ficha_detalle.php?id_fuente=5336

Lorite, M. y Jiménez, R. (2008) Impact of agricultural activity and geologic controls on groundwater quality of the alluvial aquifer of the Guadalquivir River (province of Jaén, Spain): a case study. *Environmental Geology*, 54(7), 1391–1402.

Lorite, M., Jiménez, R., Jiménez, J. y Hiscok, K. M. (2008). Integrated hydrochemical assessment of the Quaternary alluvial aquifer of the Guadalquivir River, southern Spain. *Applied Geochemistry*, 23, 2040-2054. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2008.03.013

Mahindawansha, A., Breuer, L., Chamorro, A. y Kraft, P. (2018). High-frequency water isotopic analysis using an automatic water sampling system in rice-based cropping systems. *Water*, 10, 1327. DOI:10.3390/w10101327

Manno, E., Vassallo, M., Varrica, D., Dongarrá, G. y Hauser, S. (2007). Hydrogeochemistry and water balance in the coastal wetland area of "Biviere di Gela," Sicily, Italy. *Water, Air and Soil Pollution*, 178(1-4), 179-193. DOI: 10.1007/s11270-006-9189-8

Manzano, M., Borja, F y Montes, C. (2002). Metodología de tipificación hidrológica de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión. Aplicación a los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (3), 313-330.

Martín, J. (2011). Análisis estratégico del sector hídrico en Andalucía. *Revista de estudios regionales*, 92, 147-172.

Martínez, J. (2006). Agua y sostenibilidad: algunas claves desde los sistemas áridos. *Revista Latinoamérica POLIS*, 14. <http://journals.openedition.org/polis/5096>

- Matamanda, A., Chirisa, I., Mukamuri, B., Kaduwo, P. y Mhlanga, M. (2018). Harare's deteriorating wetlands: Why sound policies and legislations are not enough. *Case Studies in the Environmental*, 2(1), 31. DOI: 10.1525/cse.2018.001198
- Mediavilla, M. J. (2014). Meteorización química. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, (22.3), 230-238.
- Merinero, R., Lunar, R. y Martínez, J. (2010). Carbonatos metanógenos y pirita frambroidal autigénica: geomarcadores de la actividad quimiosintéticos en el Golfo de Cadiz. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, macla*, 12, 28-37.
- Metrohm. (S/f). *Manual 850 Professional IC 2. 850. 3010 – AnCat*. Metrohm AG.
- Mgbenu, C.N. y Egbueri, J.C. (2019). The hydrogeochemical signatures, quality indices and health risk assessment of water resources in Umunya district, southeast Nigeria. *Applied Water Science*, 9(22). DOI: 10.1007/s13201-019-0900-5
- Ministerio de Medio Ambiente (Ed.). (2007). *III Estado y evolución del medio ambiente*. Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Missi, C. y Atekwana, E. (2020). Physical, chemical and isotopic characteristics of groundwater and surface water in the Lake Chilwa Basin, Malawi. *Journal of African Earth Sciences*, 162, 103737. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103737
- Moral, F. (2005). *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura)* [Tesis de doctorado, Universidad de Pablo de Olavide]
- Morales, A., Barberá, J. Andreo B., Mudarra, M., Martín-Rodríguez, J., Jiménez, R. y Durán, J. (2019). Preliminar isotopic characterization of the meteoric waters and groundwater from the carbonate karst aquifers of Sierras de Segura, Castril y Seca (SE of Spain). *46th IAH Congress 2019 Groundwater management and governance coping with water scarcity*.
- Morales, C., George, E., López, S., Vega, D. y Alonso, J. A. (2015). Caracterización de rocas arcillosas sello por microscopía electrónica de barrido y microanálisis de rayos x. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 9-15.
- Moreno, L., de la Losa, A., Romero, A. y Carro, S. (2009). Utilidad para la interpretación de análisis químicos de aguas subterráneas (INAQUAS) (2.0). [Aplicación en formato Excel]. Instituto Geológico y Minero de España. <https://www.igme.es/Publicaciones>

Mudarra, A. (21 de noviembre de 2018). *Tesoros escondidos del embalse del tranco*. El Tranco Centro de Ocio & Turismo Activo. <https://tranco.es/tesoros-escondidos-embalse-tranco/>

Murdoch, P., Baron, J. y Miller, T. (2000). Potential effects of climate change on surface-water quality in north america. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2), 347-366. DOI: 10.1111/j.1752-16882000.tb04273.x

Najib, S., Fadili, A., Mehdi, K., Riss, J. y Makan A. (2017). Contrinution of hydrogeochemical and geoelectrical appoches to investigate salinization process and seawater intrusion inthe coastal aquifers of Chaouia, Morocco. *Journal of Contaminant Hydrodology*, 198, 24-36.

Nouayti, N., Cherif, E., Algarra, M., Pola, M., Fernández, S., Nouayti, A., Esteves da Silva, C., Driss, K., Samlani, N., Mohamed, H., Azzirgue, M., Krawczyk, D. y Rodero, A. (2022). Determination of Physicochemical Water Quality of the Ghis-Nekor Aquifer (Al Hoceima, Morocco) Using Hydrochemistry, Multiple Isotopic Tracers, and the Geographical Information System (GIS). *Water*, 14, 606. DOI: 10.3390/w14040606

Olubanjo, O. y Adeleke, E. (2020). Assement of physico-chemical proprieties and water quality of River Osse, Kogi State. *Applied Research Journal of Enviromental Engineering*, 3(1), 21-30.

Omonmwan, S. y Esegbe, J. (2017). Effects of Solid Waste on the Quality of Underground Water in Benin Metropolis, Nigeria. *Journal of Human Ecology*, 26(2), 99-105. DOI: 10.1080/09709274.2009.11906171

Ortega, F. Parra, G. y Guerrero, F. (2006). Usos del suelo en las cuencas hidrográficas de los humedales del Alto Guadalquivir: importancia de una adecuada gestión. *Limnetica*, 25(3), 723-732. DOI: 10.23818/limn.25.49

Ortega, F. Salazar, C. y Guerrero, F. (2007). Vegetación de los humedales del Alto Guadalquivir: las lagunas de origen kárstico y lagunas sobre rañas del noreste de la provincia de Jaén. *Acta Granatense*, 6, 1-14.

Ortega, F., Parra, G. y Guerrero, F. (2003). Los humedales del Alto Guadalquivir: inventario, tipologías y estado de conservación. En Paracuellos (Coord.), *Ecología, manejo y conservación de los humedales* (pp. 113-123). Instituto de Estudios Almerienses.

Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river wáter quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621-2635. DOI: 10.1016/j.watres.2005.04.024

Pacheco, G. y Portilla, M. (1991). Mecanismos de hidratación del yeso. *Materiales de construcción*, 41(222), 27-35.

Parihar, S., Kumar, A., Kumar, A. Gupta R., Pathak, M., Shrivastav, A. y Pandey A. (2012). Physico-chemical and microbiological analysis of underground water in and around Gwalior City, MP, India. *Research Journal of Recent Sciencies*, 1(6), 62-65.

Pássaro, C. P., Rivera, C. M., Román, M. A., Cardona, L. M., Muñoz, L. M., Gómez, D., Quinceno, J. M. y Rojas, L. C. (2016). *Guía sobre principios básicos de cromatografía y sus aplicaciones*. SENA, Tecnoparque nodo Rionegro, SENNOVA y Gigaca. https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/4694/guia_cromatograf%EDa.pdf;jsessionid=A722DAB2DB0FDB0851732F42D43137CD?sequence=1

Perevochtchikova, M. (2009). La situación actual del sistema de monitoreo ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 24(3), 513–547. DOI: 10.24201/eduv24i3.1327

Pettersson, K., Boström, B. y Jacobsen, O.S. (1988). Phosphorus in Sediments — Speciation and Analysis. En Persson, G. y Jansson, M. (Eds) *Phosphorus in Freshwater Ecosystems. Developments in Hydrobiology*. Springer, Dordrecht.

Picarro. (02 de mayo de 2022). *L2130-i isotope and gas concentration analyzer measures $\delta^{18}\text{O}$ and δD for Isotopic H_2O* . <https://www.picarro.com/>

Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.

Plana, F., Traveria, A. y Martínez, S. (1982). Preparación de agregados orientados de arcilla mediante extensor. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 21(2), 115-117.

Pommer, H. y Stuyfzand, J. (2005). Identification of Temperature-Dependent Water Quality Changes during a Deep Well Injection Experiment in a Pyritic Aquifer. *Environmental Science & Technology*, 39(7), 2200-2209. DOI: 10.1021/es0486768

Preis, Y. Simonoca, G.V., Voropay, N. N. y Dyukarev, E. A. (2018). Estimation of the influence of hydrothermal conditions on the carbon isotope composition in Sphagnum mosses of bogs of Western Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211(1), 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012031

- Pu, J., Yuan, D., Xiao, Q. y Zhao, H. (2015). Hydrogeochemical characteristics in karst subterranean streams: a case history from Chongqing, China. *Carbonates Evaporites*, 30, 307–319. DOI: 10.1007/s13146-014-0226-1
- Quevedo, C., Jiménez-Millán, J., Cifuentes, G., Gálvez, A., Castellanos-Rozo, J. y Jiménez-Espinosa, R. (2021). The Potential Role of S-and Fe-Cycling Bacteria on the Formation of Fe-Bearing Mineral (Pyrite and Vivianite) in Alluvial Sediments from the Upper Chicamocha River Basin, Colombia. *Minerals*, 11(10), 1148. DOI: 10.3390/min11101148
- Quiroz, O. y Martínez, D. (2021). Distribución espacial de isótopos estables en el acuífero pampeano en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Boletín Geológico y Minero*, 132(1-2), 175-184. DOI: 10.21701/bolgeomin.132.1-2.018
- Radfard, M., Soleimani, H., Azhdarpoor, A., Faraji, H. y Hossein, A. (2021). Dataset on assessment of physical and chemical quality of groundwater in rural drinking water, west Azerbaijan Province in Iran. *Data in Brief*, 21, 556-561. DOI: 10.1016/j.dib.2018.09.078
- Ramsar Convention on Wetlands. (2018). *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and their Services to People*. Ramsar Convention Secretariat.
- Requena, A. A., Claus, F. L. y Fernández, J. C. (1991). Mineralogía y aspectos geoquímicos de los sedimentos actuales del Río Odiel (Huelva). *Cuaderno Lab. Xelóxico de Laxe*, 16, 135-144.
- Ríos, M. J y Hernández, H. (2020). Fundamentos teóricos de ICP-MS y su importancia en el análisis de elementos tóxicos en agua subterránea. *Glosa Revista de Divulgación*, 8(14), 4-15.
- Robles, J., Gilbert, B., García, J. F. y Molina, A. (2014). Monitoring of selected priority and emerging contaminants in the Guadalquivir River and other related surface waters in the province of Jaén, South East Spain. *Science of The Total Environment*, 479-480, 247-257. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.121
- Rocha, F., Silva, E., Bernardes, C., Vidinha, J. y Patinha, C. (2005). Caracterización química y mineralógica de los sedimentos de los canales Mira, Ílhavo y Ovar de la Laguna de Aveiro (Portugal). *Ciencias Marinas*, 31(1B), 253-263
- Rodríguez, M., Moral, F. y Benavente, J. (2009). Grado de dependencia de las aguas subterráneas, índice de funcionamiento hidrológico y principales amenazas en los principales humedales continentales de la depresión del Guadalquivir. *Boletín Geológico y Minero*, 120(3): 347-360.

- Rubio, J. C., González, A. y López, J. A. (Eds.). (2007). *El agua subterránea en el Parque Natural de Sierra Mágina (Jaén)*. Instituto Geológico y minero de España.
- Rubio, J. C., Martín, C., López, J. A. y Fernández, J. M. (Eds.). (2011). *El agua subterránea en el Parque Natural Sierra de Andújar (Jaén)*. Instituto Geológico y Minero de España
- Rubio, V., Vigil, R., García, R. y Gonzalez, J. A. (1996). Caracterización mineralógica de sedimentos arenosos en la cuenca del Río Ara (Huesca). *Cuaternario y Geomorfología*, 10(1-2), 33-44.
- Rueda, C., Bellón, J. P., Herranz, A. B., Legucha, M. A., Ruiz, A., Moreno, M. A., Molinos, M., Rísquez, C., Gutiérrez, M. y Portillo, M. (2021a). Ofrendas en el humedal: el santuario ibero de Haza del Rayo (Sabiote, Jaén). *Trabajos de Prehistoria*, 78(1), 140-152. DOI: 10.3989/tp.2021.12269
- Rueda, C., Herranz, A. B., Bellón, J. P., Gutiérrez, M., Legucha, M. A., Moreno, M. I. (2021b). Interdisciplinary methodology for the characterisation of a temporary paleo-wetland in loma de Úbeda (Jaén, Spain). *Inland Waters*, 11(4), 556-568. DOI: 10.1080/20442041.2021.1997046
- Sánchez, A. M. (2004). Trade-off between clutch size and egg mass, and their effects on hatchability and chick mass in semi-precocial purple swamphen. *Ardeola*, 51(2), 319-330.
- Sánchez, A. M., Rey, P., Valera, F. y Muñoz, J. (1992). Past and current distribution of the purple swamphen *Porphyrio porphyrio* L. in the Iberian Peninsula. *Biological Conservation*, 61(1), 23-30.
- Santiz-Montero, M., Rodríguez-Arana, J. y Pérez-Soba, C. (2008). Bioformación de sulfuros y carbonatos en ambientes de lago salino (Mioceno, Cuenca de Madrid): implicaciones en la alteración de silicatos. *Geo-Temas*, 10, 957-960.
- Sartori, L., Canobbio, S., Cabrini, R., Fornaroli, R. y Mezzanotte, V. (2015). Macroinvertebrate assemblages and biodiversity levels: Ecological role of constructed wetlands and artificial ponds in a natural park. *Journal of Limnology*, 74(2), 335-345. DOI: 10.4081/jlimnol.2014.1018
- Saxena, V. K. y Ahmed, S. (2001). Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. *Environmental Geology*, 40, 1084-1087. DOI: 10.1007/s002540100290
- Schlessinger, W. (2000). *Biogeoquímica. Un análisis del cambio global*. Editorial Ariel, Barcelona, España.

Stradioto, M. R., Teramoto, E. H. y Chang, H. K. (2020). Rock-solute reaction mass balance of water flowing within an aquifer system with geochemical stratification. *Applied Geochemistry*, 123, 104784. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104784

Suárez, J., Puertas, J., Anta, J., Jácome, A., Del Río, H. y Novoa, R. (2010). Nuevas estrategias de gestión sostenible del agua en medio urbano. *Spanish Journal of Rural Development*, 1(1), 1-23.

Suarez, P. y Orfeo, O. (2015). Agregación de sedimentos en una cuenca de llanura: utilización del Microscopio Electrónico de Barrido como herramienta de evaluación. *Estudios Geológicos*, 71(2), e038. DOI: 10.3989/egeol.42054.366.

Sucholas, J., Molnár, Z., Tuczaj, T. y Poschlod, P. (2022). Local traditional ecological knowledge about hay management practices in wetlands of the Biebrza Valley, Poland. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 18(1), 9. DOI: 10.1186/s13002-022-00509-9

Talukdar, D., Basumatari, D. y Rahman, S. (2022). Monitoring nature's kidneys with the aid of macrobenthic assessment: A case study in the city Wetlands of Guwahati, India. *Pollution*, 8(1), 45-56. DOI: 10.22059/POLL.2021.324514.1106

Tarazona, B. N. (2019). *Estudio de las relaciones minerales y de la interacción agua-roca en el humedal salino de Brujuelo (Provincial de Jaén)* [Tesis de máster, Universidad de Jaén]. <https://hdl.handle.net/10953.1/11362>

Taylor, C. y Druckenmiller, H. (2022). Wetlands, Flooding, and the Clean Water Act. *American Economic Review*, 112(4), 1334-1363. DOI: 10.1257/aer.20210497

Ugarte, A. (2011). *Development of new applications of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) hyphenated with different sample introduction systems* [Tesis de doctorado, Universidad del País Vasco]. <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/12444/UgarteBaztan.pdf?sequence=4>

Umbría, A. (1999). Microscopía electrónica de barrido (M.E.B) Espectroscopía de difracción de rayos X (E.D.X). En Consejería de Medio Ambiente, *Caracterización de partículas* (56-69). Consejería de Medio Ambiente y Dirección General de Prevención y Calidad Ambiental, España.

Valenzuela, L., Ramírez, J. y Palomares, R. (2013). Composición isotópica del agua subterránea y su relación con la salinidad en el valle de San Luis Río Colorado en Sonora, México. *Información tecnológica*, 24(2), 57-66. DOI: 10.4067/S0718-07642013000200008

Vera, E., López, A., Pineda, Y., Useda, O., Peña, G., Daza, O.J., Lozano, L. F. y Ardila, M. A. (2018). *Caracterización, beneficio y usos potenciales de minerales estratégicos del departamento de Boyacá*. Tunja: Editorial UPTC.

Wang, X. Q., Liu, T.X., Zhang, J.Y., Wang, G. L. y Duan, L. M. (2018). Profile distribution and dynamics of soil organic carbon and total nitrogen in the Horqin meadow wetland during the growing season. *Acta Prataculturae Sinica*, 27(12), 34-44. DOI: 10.11686/cyxb2018024

Warren, B. E. (1990). *X-ray diffraction*. Dover Publications, INC.

WHO [World Health Organization]. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva.

Zhang, B., Song, X., Zhang, Y., Han, D., Tang, C., Yu, Y. y Ma, Y. (2012). Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China. *Water Research*, 48(8), 2737-2748. DOI: 10.1016/j.watres.2012.02.033

Zheng, P., Li, C., Ye, C., Wang, H., Wei, W. W., Zheng, Y. y Zheng, X. Y. (2022). Characteristic and affecting factors of wetland herbs' distribution in the radiant belt toward land of lake–terrestrial ecotone in Tibet, China. *Environmental Sciences Europe*, 34(1), 14. DOI: 10.1186/s12302-022-00593-4

8. Fuentes de financiación

Beca de la Fundación Carolina y Universidad de Jaén Convocatoria 2021-2022 (Planeta)



Fundación
Carolina



Universidad
de Jaén

9. Breve resumen de las asignaturas de máster realizadas

Código	Asignatura	Tipo	Créditos
Primer cuatrimestre (2021-2022)			
77012001	Métodos avanzados de análisis de datos	OBL	4
77012002	Técnicas geomáticas aplicadas al medio natural	OBL	4
77012003	Recursos hídricos y ecosistemas acuáticos	OBL	4
77012004	Conservación y restauración de sistemas terrestres	OBL	4
77012005	Caracterización de los componentes físicos del hábitat	OBL	4
77012006	Caracterización de los bióticos del hábitat	OBL	4
Segundo cuatrimestre (2021-2022)			
77012007	Explotación sostenible de suelos y agroecosistemas	OBL	4
77012008	Modelización de la distribución potencial de especies y hábitats	OBL	4
77013001	Invasiones biológicas	OPT	3
77013002	Enfermedades de la fauna silvestre	OPT	3
77013003	Técnicas de conservación de flora amenazada	OPT	3
77013004	Técnicas de conservación de fauna amenazada	OPT	3
77015001	Prácticas externas	PE	4
77016001	Trabajo de fin de máster	TFM	12

10. Currículum vitae del autor

NAHUM ELIAS OROCIO ALCANTARA

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

PERFIL

Me apasiona colaborar en equipos interdisciplinarios orientados en la transición hacia la sostenibilidad. Me interesa el medio ambiente, la política, la gobernanza, y las instituciones. Cuento con experiencia en planificación, coordinación, gestión y monitoreo de proyectos. Me identifico con equipos de trabajo enfocados en el desarrollo de proyectos de excelencia e impacto a nivel local, regional y global.

HABILIDADES Y APTITUDES

Cuento con habilidades para comunicar temas complejos, aprendizaje continuo, trabajo colaborativo, capacidad resolutoria, pensamiento crítico, estratégico y analítico. Soy flexible, empático, sociable y resiliente. Abierto a conocer, aprender y desarrollar mis habilidades en un entorno de cooperación con buenas competencias organizacionales.

COMPETENCIAS

- Español [lengua materna]
- Inglés [Intermedio]
- Arcmap [intermedio]
- ArcGIS [Básico]
- R [básico]
- Cytoscape [avanzado]
- Paquetería Office [intermedio]
- SCRUM [básico]
- Design thinking [básico]
- Lean startup [básico]

CERTIFICACIONES

- Diploma en formación emprendedora
- Certificación Scrum Fundamentals

CONTACTO

@ nahum.orocio@gmail.com

EXPERIENCIA PROFESIONAL

Asistente de investigación

El Colegio de México A.C [México]

- Desarrollé e implementé procesos para la clasificación y estructuración de información científica y administrativa.
- Gestioné, compilé y sistematicé información para la re-acreditación del Doctorado en Estudios Urbanos y Ambientales (DEUA) del CEDUA.
- Proporcioné seguimiento a diversas actividades de los proyectos y acciones de la coordinación del DEUA.

Asistente de investigación

Universidad Autónoma Metropolitana [México]

- Planifiqué e implementé actividades de docencia y preservación de la cultura en el Departamento del Hombre y su Ambiente.
- Gestioné, coordiné y ejecuté acciones de investigación en el Proyecto Mareas Rojas Emergentes de México.
- Colaboré en la planificación, ejecución y monitoreo de del proyecto interdisciplinario sobre Monitoreo de la calidad del agua y biodiversidad en el Área Natural Protegida Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco
- Organicé y asistí a los siguientes eventos: curso sobre estudios de ecosistemas acuáticos: técnicas de muestreo y análisis de información; encuentro académico Día del Biólogo 2017 y 2018.
- Participé como ponente en la III Reunión Científica Interinstitucional sobre Diversidad Biológica

ESCOLARIDAD

- Licenciatura en Biología [promedio general 9.83]

Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco
[México] septiembre 2013- julio 2017

PUBLICACIONES

- Torres, D. M., Olvera, M., Vieyra, C., García, L. V., Orocio, N. E., y Monroy, M. del C. (2017). Physiological groups of heterotrophic community bacteria present at River Actopan, Chachalacas barrier, Veracruz. *Scientific Journal of Animal Science*, 6(1), 376-382. Retrieved from <http://www.sjournals.com/index.php/sjas/article/view/165>
- Vázquez, G., Molina, K., Medina, G., Orocio, N. E. y Arana, F. C. (2016). Depuración de enterobacterias en Tibifex tubifex por efecto de la microalga *Chlorella vulgaris*. *Revista de Agroecosistemas*, 3(suplemento 3), 57-64. <https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/volumen-3-s-3/>

PARTICIPACIÓN EN CONFERENCIAS, CONGRESOS, SEMINARIOS Y TALLERES

- Almanza, S., Figueroa, M. G., Orocio, N. E., Ferrara, M. J. y Malpica, A. Biodiversidad microalgal de los vertederos de agua residual de las PTARs Cerro de la Estrella y San Pedro Atocpan (Cartel). *Tercera Reunión Científica Interinstitucional sobre Diversidad Biológica*. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. 18 de mayo de 2018.
- Orocio, N. E., Figueroa, M. G., Almanza, S., Ferrara, M. J. y Vargas, R. C. Diversidad de algas de la División Euglenophyta de San Gregorio Atlapulco, CDMX (Cartel). *Tercera Reunión Científica Interinstitucional sobre Diversidad Biológica*. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. 18 de mayo de 2018.
- Torres, D. M., Olvera, M., Vieyra, C., García, L. V., Orocio, N. E., y Monroy, M. del C. Comunidad heterótrofa bacteriana presente en el Río Actopan, Barra Chachalacas, Veracruz (Ponencia). XVI Congreso Internacional y XXII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Universidad de Quintana Roo. Del 7-9 de junio de 2017.
- Molina, K., Medina, G., Orocio, N. E., Vázquez, G. y Arana, F. Depuración de enterobacterias en Tubifex tubifex por efecto de la microalga Chlorella vulgaris (Ponencia). XV Congreso Internacional y XXI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Del 15-17 de junio de 2016.
- Orocio, N. E., Molina, K., Arana, F. C. y Vázquez, G. Efecto de un probiótico en el crecimiento y diversidad enterobacteriana del cultivo de Ambystoma velasci (Ponencia). XV Congreso Internacional y XXI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Del 15-17 de junio de 2016.
- Orocio, N. E. Seminario y Mesas de Trabajo sobre la laguna de Sontecomapan, Veracruz (Asistente). Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. 28-29 de enero de 2016.
- Orocio, N. E., Torres, D. M., Herrera, S., Ramírez, R. y Nuñez, J. Caracterización físico-química de la zona lacustre de Xochimilco (Cartel). Encuentro Académico del Día del Biólogo 2016. Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco. 28 de enero de 2016.
- Orocio, N. E. Efecto de un probiótico en el crecimiento del ajolote Ambystoma velasci (Ponencia). 11º Foro estatal y 3º Foro Regional de Investigación y Experiencias Educativas y Productivas. Subdirección de Enlace Operativo en el Estado de Morelos. 28-29 de mayo 2015.
- Orocio, N. E. Evaluación de la hormona 17 α metil-testosterona y aceite de pescado en el crecimiento del pez Xiphophorus maculatus (Ponencia). 11º Foro estatal y 3º Foro Regional de Investigación y Experiencias Educativas y Productivas. Subdirección de Enlace Operativo en el Estado de Morelos. 28-29 de mayo 2015.
- Orocio, N. E. El acoso en las escuelas como un problema de interculturalidad. Congreso Módulo Conocimiento y Sociedad (Ponencia). Universidad Autónoma Metropolitana Universidad Autónoma. Noviembre de 2013.

CURSOS Y TALLERES

- Legislación ambiental mexicana. ENTER CAPA México. 21 de marzo de 2021. Duración 24 horas.
- Interpretación e implementación de la Norma ISO 14001:2015. ENTER CAPA México. 21 de marzo de 2021. Duración 16 horas.
- Procesos de democratización de la política del agua: elementos teóricos y empíricos. Universidad Nacional Autónoma de México. Del 02 al 03 de septiembre de 2019. Duración 8 horas.
- Desarrollo de modelos conceptuales para el estudio del ciclo del agua en la ciudad. Universidad Nacional Autónoma de México. 21 de mayo de 2019.
- Diálogos Sociedad-Naturaleza desde la Ecología Política. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Del 14 al 17 de enero de 2019. Duración 12 horas.
- Estudio de ecosistemas acuáticos: Técnicas de muestro y análisis de información. Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco. Del 16 al 18 de enero de 2018. Duración: 11 horas.
- Primer Módulo del Diplomado Internacional: producción, procesamiento y usos de Stevia rebaudiana. Universidad Autónoma Chapingo. Del 2 al 5 de marzo de 2016.