



Análisis De La Influencia De La Composición Mineralógica De Las Partículas Para La  
Formación De Oil-Particle Aggregates -Opas

Gerardo Mosquera Urón, Wendy Johanna Rivera Velásquez

Trabajo de Grado para optar el título de ingeniería química

Director

Crisóstomo Bajasas Ferreira

Ingeniero químico M. Sc.

Diana Marcela Ibarra Mojica

Ingeniera sanitaria y ambiental – M. Sc. Ingeniería química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de ingeniería química

Bucaramanga

2020

### **Dedicatoria**

A Dios y a la Virgen María, por darme fortaleza para continuar cuando me sentía agotado y regalarme las oportunidades para seguir creciendo.

A mi madre, Luz Dary Urón Castro por su apoyo incondicional en mi desarrollo profesional, su acompañamiento durante mi crecimiento personal y espiritual y el gran esfuerzo que ha realizado para ayudarme a obtener este título. El amor que me has ofrecido es incontable y espero podamos compartir más logros como este juntos.

A mis abuelos, Saray Castro y Jorge Urón por todas las oraciones que hicieron para verme graduado, por toda la sabiduría que me compartieron y sus palabras de motivación que me alentaban a continuar.

A mi compañera de trabajo de grado, Wendy Rivera por ser una persona increíble, por su gran amor, paciencia, acompañamiento durante mi vida académica y su dedicación al proyecto. Has sido una persona importante durante este trayecto de mi vida y espero que continuemos compartiendo nuestros aciertos y desaciertos.

**Gerardo Urón**

A mis padres Erika Marcela Velásquez y Luis Antonio Rivera por haberme acompañado durante mi crecimiento personal, brindarme las enseñanzas que me han hecho ser la persona que soy y su apoyo incondicional en mi desarrollo profesional.

A mis familiares por el amor que me brindan, y por sus oraciones que me impulsan alcanzar mis logros

A mi tía Lidys Rivera por siempre apoyarme a lo largo de mi vida académica y profesional, inspirándome a seguir creciendo y tener metas más altas.

A mi compañero de trabajo de grado, Gerardo Urón por convertirse en alguien importante en mi vida, por apoyarme siempre en todos los proyectos que tengo, e impulsarme a dar siempre lo mejor de mí, le agradezco a la vida el permitirme compartir esta etapa a su lado.

**Wendy Rivera**

### **Agradecimientos**

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por habernos acogido e instruido a lo largo de estos años de academia.

Al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira por su acompañamiento y apoyo durante la realización del proyecto.

A nuestra codirectora Diana Ibarra Mojica por todas las enseñanzas que nos transmitió, su paciencia y su esfuerzo para la culminación del trabajo de grado.

Al Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en industria y energía (CIDES) por su acompañamiento en nuestro trabajo de grado, su calidez y amabilidad.

Al Laboratorio de Espectroscopía Atómica y Molecular por recibirnos en sus instalaciones y prestarnos sus equipos para el desarrollo de nuestro trabajo.

Al Laboratorio de Rayos X del Parque Tecnológico Guatiguara por los servicios prestados.

Al profesor Viatcheslav Kafarov por la atención prestada y colaboración.

A mis compañeros de la universidad, Faider Pabón, Paola Vera y Andrés Felipe Valbuena que compartieron su amistad y sus conocimientos conmigo durante mi trayecto académico.

**Contenido**

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 10 |
| 1.    Objetivos .....   | 12 |
| 1.1.  Objetivo General.....   | 12 |
| 1.2.  Objetivos Específicos.....  | 12 |
| 2.    Marco Teórico Y Estado Del Arte .....   | 13 |
| 2.1.  Agregados crudo-partículas OPA. ....  | 14 |
| 2.2.  Influencia de los minerales en la formación de agregados crudo-partícula.....   | 16 |
| 3.    Metodología .....   | 18 |
| 3.1.  Extracción y caracterización mineralógica de las muestras de siete de sedimentos naturales provenientes del río Magdalena (Fase I) .....  | 18 |
| 3.2.  Comportamiento esperado de las partículas, mediante revisión de literatura científica (Fase II).....                                      | 19 |
| 4.    Resultados Y Análisis .....   | 19 |
| 4.1.  Extracción y caracterización mineralógica de las muestras de tres tipos de sedimentos naturales extraídos del río Magdalena (Fase I)..... | 19 |
| 4.2.  Comportamiento esperado de las partículas, mediante revisión de literatura científica (Fase II).....                                      | 25 |
| 4.2.1.  Presencia de materia orgánica en los sedimentos.....  | 25 |
| 4.2.2.  Carácter hidrofílico o hidrofóbico de las partículas. ....  | 26 |
| 4.2.3.  Tipo de minerales .....   | 29 |
| 5.    Conclusiones .....  | 34 |
| 6.    Recomendaciones.....  | 35 |
| Referencias Bibliográficas .....  | 37 |
| Apéndices.....  | 42 |

**Lista de Tablas**

**Tabla 1** Condiciones de medición utilizadas en el difractómetro. ....21

**Tabla 2** Comparación en la cantidad y tipo de minerales presentes en las muestras molidas y no molidas. ....24

**Lista de Figuras**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figura 1</b> Formación de OPAS en un ambiente marino.....   | <b>16</b> |
| <b>Figura 2</b> Representación gráfica de los tipos de agregados crudo-partícula.....                                      | <b>17</b> |
| <b>Figura 3</b> Puntos de extracción de sedimentos del río Magdalena.....  | <b>20</b> |
| <b>Figura 4</b> Diagrama de difracción de la muestra P7-C tratado mediante el software DIFFRAC.EVA<br>.....                | <b>22</b> |
| <b>Figura 5</b> Minerales presentes y su recurrencia en las muestras de sedimentos extraídas del río<br>Magdalena<br>..... | <b>23</b> |
| <b>Figura 6</b> Microscopía de laser confocal de agregados crudo partículas formados por cuarzo y<br>calcita .....         | <b>28</b> |
| <b>Figura 7</b> Interacciones entre las partículas minerales de cuarzo y el crudo en un ambiente marino<br>.....           | <b>30</b> |

**Lista de Apéndices**

|   |    |
|---|----|
| Apéndice A. Resultados De Análisis De Difracción De Rayos X.....                  | 42 |
| Apéndice B. Minerales Obtenidos En El Análisis Mineralógico Mediante Rayos X..... | 47 |

## Resumen

**Título:** Análisis De La Influencia De La Composición Mineralógica De Las Partículas Para La Formación De Oil-Particle Aggregates -Opas

**Autor:** Gerardo Mosquera Urón, Wendy Johanna Rivera.

**Palabras clave:** • 1. Derrames de hidrocarburos • 2. OPAS • 3. Mineralogía • 4. Sedimentos • 5. Dispersión • 6. Difracción de rayos X

### Descripción:

Los derrames de crudo han sido una de las amenazas que enfrenta la industria petrolera en relación con los desastres ambientales, pues representan graves daños en cuanto a problemas de contaminación, pérdida de biodiversidad y del equilibrio del ecosistema. En Colombia, Castro y Pinilla establecieron que entre 2014 y 2017 cerca del 40% de los derrames afectaron el agua dulce del país. Para hacer frente a este tipo de accidentes se realizan técnicas de modelado que toman en cuenta los parámetros fisicoquímicos del crudo una vez entra en contacto con el río, la turbulencia presente en estos favorece la descomposición de la mancha de crudo en pequeñas gotas que pueden interactuar con los minerales presentes en el cuerpo de agua dando lugar a la formación de agregados crudo-partículas (OPAS). Mediante difracción de rayos X se analizaron diez muestras de sedimentos del río Magdalena en las que se identificaron 34 tipos de minerales donde el cuarzo, la albita y la andesina fueron los más frecuentes encontrándose en diez, siete y cinco muestras respectivamente. Por medio de revisión literaria se estudió la influencia que tienen los minerales en el comportamiento de un derrame de crudo en un cuerpo de agua. Se encontró que el cuarzo al interactuar con el crudo en el agua genera OPAS con forma de gota, es decir, un glóbulo esférico de crudo cubierto por partículas, por otra parte, se evidenció la poca información respecto a la interacción entre el hidrocarburo y partículas inorgánicas en agua dulce. Adicionalmente, se investigaron los parámetros que influyen en la formación de agregados crudo-partículas resaltando que diversos autores mencionan la hidrofobicidad, la salinidad y el área superficial como factores importantes en la afinidad y la forma final que tendrán los OPAS formados.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Crisóstomo Bajas Ferreira Codirector: Diana Marcela Ibarra Mojica.

**Abstract**

**Title:** Analysis Of The Influence Of The Mineralogical Composition Of The Particles For The Formation Of Oil-Particle Aggregates -Opas

**Author:** Gerardo Mosquera Urón, Wendy Johanna Rivera.

**Keywords:** • 1. Hydrocarbon spills • 2. OPAS • 3. Mineralogy • 4. Sediments • 5. Dispersion • 6. X-ray diffraction

**Description:**

Oil spills have been one of the threats faced by the oil industry in relation to environmental disasters, as it represents serious damage in terms of pollution problems, loss of biodiversity and the balance of the ecosystem. In Colombia, Castro and Pinilla established that between 2014 and 2017 about 40% of spills affected the country's fresh water. To deal with these types of accidents, modeling techniques are carried out that take into account the physicochemical parameters of the oil once it comes into contact with the river, the turbulence present in these favors the decomposition of the oil slick into small drops that can interact with the minerals present in the water body giving rise to the formation of crude-particle aggregates (OPAS). By means of X-ray diffraction, ten samples of sediments from the Magdalena River were analyzed, where 34 types of minerals were identified where quartz, albite and andesine were the most frequent, found in ten, seven and five samples respectively. By means of a literary review, the influence of minerals on the behavior of an oil spill in a body of water was studied. It was found that quartz when interacting with oil in water generates drop-shaped OPAS, that is, a spherical globule of crude covered by particles, on the other hand, little information was evidenced regarding the interaction between hydrocarbon and particles inorganic in fresh water. Additionally, the parameters that influence the formation of crude-particle aggregates were investigated, highlighting that various authors mention hydrophobicity, salinity and surface area as important factors in the affinity and the final form that the formed OPAS will have.

---

\*Degree work

\*\* Physicochemical Engineering Faculty. School of Chemical Engineering. Director: Crisóstomo Bajas Ferreira Co-director: Diana Marcela Ibarra Mojica.

### **Introducción**

Los derrames de crudo han sido una de las amenazas que enfrenta la industria petrolera en relación con los desastres ambientales, pues representa graves daños en cuanto a problemas de contaminación, pérdida de biodiversidad y del equilibrio del ecosistema (Kingston, 2002), así como afectaciones a la salud humana (Aguilera, Méndez, & Laffon, 2010). En Colombia, los derrames de crudo ocurren en zonas continentales afectando principalmente ríos, deteriorando el hábitat de las especies que allí se encuentran además de generar dificultades a las comunidades aledañas al cuerpo de agua (Miranda & Restrepo, 2004). Durante el periodo de 2004-2017 se registraron alrededor de 6300 casos de derrames de hidrocarburos vertiéndose cerca de 3.6 millones de barriles (Castro & Pinilla, 2017).

La mitigación de los daños ocasionados por este tipo de catástrofes se realiza mediante un análisis de riesgo que tenga en cuenta los diferentes procesos fisicoquímicos que actúan en el petróleo al entrar en el medio. Entre estos mecanismos se pueden encontrar la dispersión, la adhesión, evaporación, emulsificación, la interacción con partículas del medio, entre otros. (Ibarra-Mojica et al. 2018). La interacción del crudo con partículas juega un rol importante en el destino final del crudo derramado, participando directamente en la dispersión y degradación de este en la masa de agua (Muschenheim and Lee 2002).

Para estudiar el comportamiento del petróleo se han creado diversas técnicas de modelado que ofrecen información para diseñar planes de contingencia adecuados para cada tipo de derrame teniendo en cuenta los procesos fisicoquímicos que afectan el crudo una vez entra en contacto con el ambiente.(Fingas, 2015). No obstante, la mayoría de estos programas de simulación no toman en cuenta la mineralogía de los sedimentos presentes en cuerpos de agua, por lo que la aplicación de dichos modelos puede resultar inexacta cuando se utilizan en lugares con carga sedimentaria

alta (Zhu, Waterman, & García, 2018). En Colombia, no hay otros estudios de interacción de los minerales presentes en los sedimentos del río Magdalena con el crudo. Se encuentra entonces la necesidad de estudiar los parámetros que podrían alterar el comportamiento del hidrocarburo en presencia de sedimentos minerales del río colombiano.

En el presente trabajo se estudió la influencia que tiene la composición mineralógica en el comportamiento del derrame de crudo en un cuerpo de agua, con el fin de analizar su efecto en la formación de OPAS (agregados crudo-partículas) por medio de literatura dadas las limitaciones que se presentaron para el desarrollo de pruebas de laboratorio por la pandemia del COVID-19.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Analizar la influencia de la composición mineralógica de las partículas para la formación de oil-particle aggregates -OPAs.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar muestras de partículas a partir de sedimentos naturales provenientes del río Magdalena y determinar su composición mineralógica.
- Inferir el posible efecto de la composición mineralógica de las partículas, en la formación de OPAS mediante revisión bibliográfica.

## 2. Marco Teórico Y Estado Del Arte

Desde el momento en que el crudo se vierte en el medio ambiente, inicia un proceso que se hace difícil de remediar con el paso del tiempo, debido a que factores como la intemperización, contacto con el agua y los sedimentos presentes en ella dan lugar a interacciones que alteran sus propiedades físicas y químicas, cuyo estudio se torna indispensable en el momento de proponer una solución (Mendelsohn et al., 2012).

El impacto ambiental que un derrame genera depende considerablemente del ecosistema presente en donde ocurre, la recuperación biológica de este comienza tan pronto la toxicidad disminuye a niveles que los organismos presentes puedan tolerar (Baker, Clark, Kingston, & Jenkins, 1990). Los daños pueden ser mínimos o mayores, los mínimos se pueden dar cuando el derrame ocurre en mar abierto ya que hay mayor posibilidad de dispersión, sin embargo, los daños ecológicos cerca a la costa, bahías y ríos son de mayor impacto, llegando a poder causar la muerte de toda una comunidad biológica (International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, 1991).

El estudio de derrames de crudo en mares es amplio y se han desarrollado diversos modelos que toman en cuenta las variables fisicoquímicas tanto del ambiente como del crudo. Spaulding (2017) realizó un resumen relacionado con diferentes modelos existentes que se usan para la simulación y el tratamiento de derrames de hidrocarburos. En cuanto a derrames de crudo en cuerpos de agua dulce, Yapa & Shen, (1994) resumieron algunos modelos hidrodinámicos que existían para la simulación de derrames en ríos tomando en cuenta los diversos mecanismos, tanto físicos como químicos que influyen en el comportamiento de la mancha a lo largo del cuerpo de agua. Gong et al., (2014) estudió la interacción entre crudo y sedimentos del río Kalamazoo (Estados Unidos) y

encontró que el tipo de agregado que se formó y de mayor predominancia es el tipo gota, el cual consiste en un glóbulo esférico de aceite con granos de sedimento unidos a la superficie. Sin embargo, poco se menciona acerca de la interacción entre sedimentos y el hidrocarburo.

En Colombia, Ibarra-Mojica, et. al. (2018) simularon diversos casos de derrames de crudo en un sector del río Magdalena mediante el software de uso libre GNOME tomando en cuenta los diversos procesos fisicoquímicos que determinan el comportamiento del hidrocarburo en el río destacando que el software no contemplaba el efecto de las partículas. Por el momento, no hay estudios relacionados con la interacción crudo-partícula que tome en cuenta la composición mineralógica de los sedimentos del río Magdalena.

### **2.1. Agregados crudo-partículas OPA.**

La interacción entre crudo y partículas fue estudiado por (Stoffyn-egli, Lee, Box, & Bj, 2003) al caracterizar diversos minerales y estudiar los diferentes agregados que se pueden conformar al interactuar el crudo con dichos minerales. Además, determinó que la turbulencia con la que se ejecuta el experimento y la viscosidad del crudo influyen en gran medida en el tipo de formación de agregado OPA (agregado crudo-partícula). Los minerales usados para sus estudios fueron extraídos de sedimentos marinos.

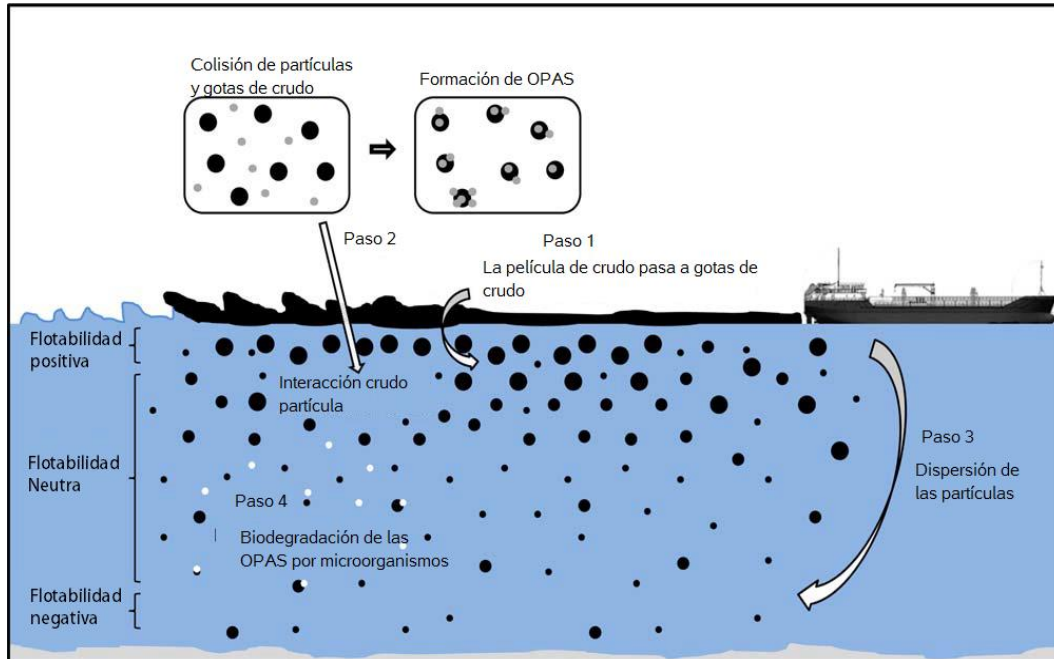
El movimiento que tendrá el petróleo en el agua es afectado por distintos elementos como lo son la corriente, el viento, la emulsificación, además de la mezcla dispersa cuando esta baja sobre la columna de agua en la cual se pueden adherir partículas en suspensión (Yapa & Shen, 1994). En cuanto a las partículas en suspensión en un río, los sedimentos tienden a formar agregados con el crudo llamados OPAS (oil-particle aggregates) los cuales pueden influir en el destino de la mancha de crudo en el cuerpo de agua

La interacción entre el agua y el crudo resulta importante debido a la formación de emulsiones, además, la turbulencia presente en el medio ocasiona el rompimiento del aceite dando lugar a la formación de gotas (Delevigne & Sweeney, 1988). Estas gotas tienen una interacción con las partículas de minerales presentes en la columna de agua, las cuales terminan adhiriéndose a las gotas de aceite. El término acogido a las combinaciones entre el petróleo y las partículas es OPA (Oil-particle aggregate) el cual toma en cuenta las distintas partículas que pueden asociarse con el crudo (sedimentos orgánicos e inorgánicos) (Fitzpatrick et al., 2015)

Las interacciones crudo-partícula dependen de las propiedades físicas del crudo y de las partículas como también de las condiciones ambientales como la corriente, el clima y la turbulencia en la columna de agua. La formación de OPAS ocurre por las interacciones entre las cargas eléctricas de los compuestos polares del crudo y las partículas presentes en el medio (Bandara, Yapa, & Xie, 2011). La formación de los agregados crudo partículas se da en cuatro pasos; rompimiento de la mancha de crudo en gotas individuales, interacción de las gotas con partículas presentes en el medio acuoso formando los agregados crudo-partícula, dispersión de los OPAS en la columna de agua dependiendo de su flotabilidad y finalmente la biodegradación de estos por parte de los microorganismos (Loh, Shim, Ha, & Yim, 2014).

El destino de los agregados crudo-partícula dependerá del tipo de OPA formado y su flotabilidad; aquellas con flotabilidad positiva permanecerán en la superficie del cuerpo de agua mientras que las de flotabilidad neutra y negativa estarán en medio de la columna de agua y asentadas en el fondo respectivamente (Loh et al., 2014). (Fig 1)

*Formación de OPAS.*

**Figura 1***Formación de OPAS en un ambiente marino*

Nota. Formación de OPAS y su destino final de acuerdo con la flotabilidad de estas. Extraído de (Loh et al., 2014) Modificado por autor.

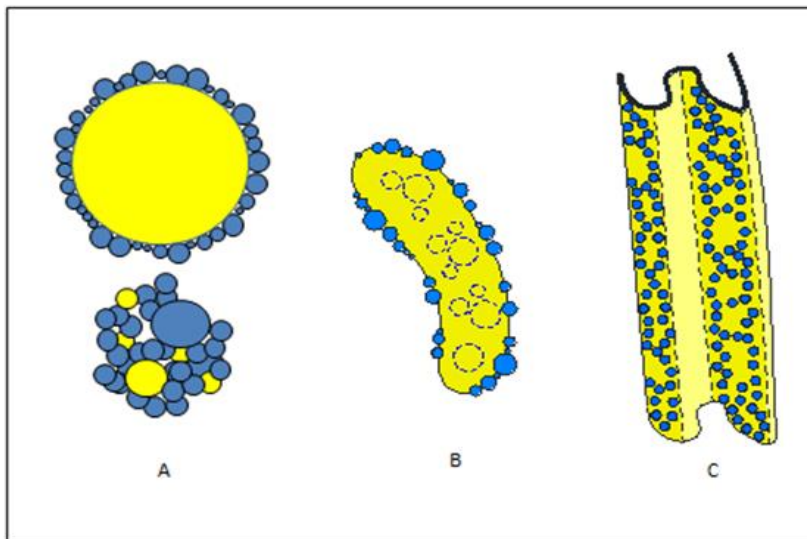
## 2.2. Influencia de los minerales en la formación de agregados crudo-partícula

Stoffyn-Egli & Lee, (2002) estudiaron la estructura de los OPAS formados con minerales en su laboratorio. Dentro de estas formas distinguieron tres tipos de estructuras: agregados tipo gota, sólido y escama. El tipo gota se caracteriza por ser una esfera de crudo dispersa y las partículas minerales están unidas únicamente en su superficie. Su tamaño es variable (de unos pocos micrómetros) y se puede presentar en el medio como una formación única o de múltiples gotas de crudo formando agregados mucho más grandes. Los agregados sólidos son no esféricos, con contornos irregulares y elongados dependiendo del mineral que esté unido al crudo. Pueden alcanzar largos de hasta 300  $\mu\text{m}$ . Por último, los agregados tipo escama tienen forma similar a una membrana, su flotabilidad es usualmente positiva o neutra y a diferencia de los OPAS sólidos, los

agregados tipo escama se distinguen porque poseen pliegues. Además, los OPAS de tipo sólido y copo no necesariamente se forman a partir de gotas de crudo, es decir, pueden interactuar con la fase continua del petróleo.

## Figura 2

*Representación gráfica de los tipos de agregados crudo-partícula*



Nota. Representación gráfica de los tipos de agregados crudo-partícula OPA tipo gota única y múltiple (A) OPA tipo sólido con partículas minerales en su interior (B) OPA tipo escama, con su forma plegada unida a partículas minerales (C). El color amarillo representa el crudo y el azul las partículas minerales. Extraído de (Boufadel, Lee, & Bejarano, 2015)

Uno de los factores que altera la estructura y el tipo de agregado que se forma es el tipo de mineral que interactúa con el crudo ya que las propiedades físicas y químicas de los minerales se comportan diferente unos de otros con las gotas de crudo. Dependiendo del tipo de mineral, los agregados pueden tener una flotabilidad positiva, neutra o negativa, así mismo, intervienen en la forma que adquieren los agregados (Loh et al., 2014; Stoffyn-Egli & Lee, 2002)

La caracterización de minerales en cuanto a su tamaño, estructura cristalina, composición química o textura es importante para entender la interacción de estos con otros minerales o sustancias. En el estudio de derrames de hidrocarburos, conocer la composición de los sedimentos permite

entender cómo de acuerdo con los tipos de minerales presentes en estos afecta el comportamiento del crudo (Loh & Yim, 2016; H. Zhang et al., 2010).

La selección de los métodos analíticos para caracterizar los minerales depende de varios factores como la precisión deseada, el tipo de muestra y el tipo estudio para el que será necesario la determinación de la composición (Cook, 2000). Numerosos autores han usado el método de difracción de rayos X para el estudio mineralógico de diferentes muestras de sedimentos, ya sean marinas o de ambientes rivereños (D. A. Khelifa et al., 2008; Kenneth Lee, Stoffyn-Egli, & Owens, 2002; Weise, Nalewajko, & Lee, 1999).

### 3. METODOLOGÍA

El cumplimiento de los objetivos de este trabajo de grado se realizó mediante un procedimiento que constó de dos fases, la extracción y caracterización mineralógica de sedimentos provenientes del río Magdalena y el análisis de comportamiento esperado de la interacción del crudo con las partículas suspendidas en el agua, mediante revisión de literatura científica

#### **3.1. Extracción y caracterización mineralógica de las muestras de siete de sedimentos naturales provenientes del río Magdalena (Fase I)**

Se analizaron 10 muestras de sedimentos extraídas del río Magdalena. El tratamiento de adecuación constó de un secado durante 24 horas a 110 °C y posterior tamizado en húmedo, con la finalidad de obtener el tamaño de grano requerido (<38 µm) para realizar el análisis en la caracterización mineralógica mediante difracción de rayos X.

Adicional al procedimiento descrito, se realizó la molienda de 3 muestras de diferentes sedimentos sin tamizar, con el propósito de analizar la composición mineralógica de la suma de todos los tamaños de grano en la muestra y compararlo con los resultados encontrados de los sedimentos

tamizados. La molienda se realizó en un molino de anillos, se pesaron previamente 50 gramos de la muestra y se molieron durante 15 minutos por intervalos de 3 minutos. La muestra molida se tamizó únicamente en seco en el tamiz de malla No.400, ya que para el análisis solo se busca llegar a las partículas de tamaño menor a 38  $\mu\text{m}$ .

Luego de que las muestras fueran debidamente molidas y tamizadas, se etiquetan y son enviadas al Laboratorio de Rayos X del Parque Tecnológico Guatiguará adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y extensión de la Universidad Industrial de Santander. Los difractogramas de las muestras son luego tratados mediante el programa DIFFRAC.EVA™.

### **3.2. Comportamiento esperado de las partículas, mediante revisión de literatura científica (Fase II)**

Se realizó revisión bibliográfica de literatura científica con investigaciones realizadas por autores que estudian la interacción de partículas en los derrames de hidrocarburos tanto en mares como en ríos, con el propósito encontrar un comportamiento estimado de esta interacción con los minerales encontrados en las muestras de sedimentos del río Magdalena.

## **4. Resultados Y Análisis**

### **4.1. Extracción y caracterización mineralógica de las muestras de tres tipos de sedimentos naturales extraídos del río Magdalena (Fase I)**

La extracción de sedimentos se realizó en diferentes puntos del río Magdalena entre Barrancabermeja y Puerto Wilches como se ilustra en la figura 3. Se escogió este tramo debido a la alta actividad petrolífera de la región por lo que está expuesta a accidentes relacionados con

derrames de hidrocarburos. Los sedimentos extraídos se conservaron bajo refrigeración para ser posteriormente secados y preparados para su análisis mineralógico.

### Figura 3

*Puntos de extracción de sedimentos del río Magdalena, Colombia*



Nota. Ubicación geográfica de las muestras de sedimentos extraídos del río Magdalena entre Barrancabermeja y Puerto Wilches

Las muestras de sedimentos fueron sometidas a una inspección visual inicial, donde se evaluaron las diferencias físicas observables, de esta forma fueron seleccionados 7 diferentes sedimentos que tenían color y distribución de tamaño diferente dónde esta última se evidenció mediante la granulometría. Dichas muestras se les realizó la preparación para el análisis de su composición mineralógica mediante difracción de rayos X ofrecido por el Laboratorio de Rayos X del Parque Tecnológico Guatiguará adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y extensión de la Universidad Industrial de Santander. Las condiciones a las cuales fueron realizados los análisis se observan en la tabla 1:

**Tabla 1**

Condiciones de medición utilizadas en el difractómetro.

| Condiciones de medición               |                |
|---------------------------------------|----------------|
| Voltaje                               | 40 Kv          |
| Corriente                             | 40 mA          |
| Rendija de Divergencia                | 0.6 mm         |
| Rendijas Soller Primerio y Secundario | 2.5°           |
| Tamaño de paso                        | 0.02035 2Theta |
| Tiempo de paso                        | 0.6 s          |
| Rango de registro                     | 2 a 70 2Theta  |
| Radiación                             | Cobre (Cu)     |
| Filtro                                | Níquel         |
| Uso de anti-dispersor de aire         | Si             |
| Detector                              | Lineal LynxEye |
| Tipo de barrido                       | A pasos        |

*Nota.* Condiciones de medición utilizadas en el difractómetro

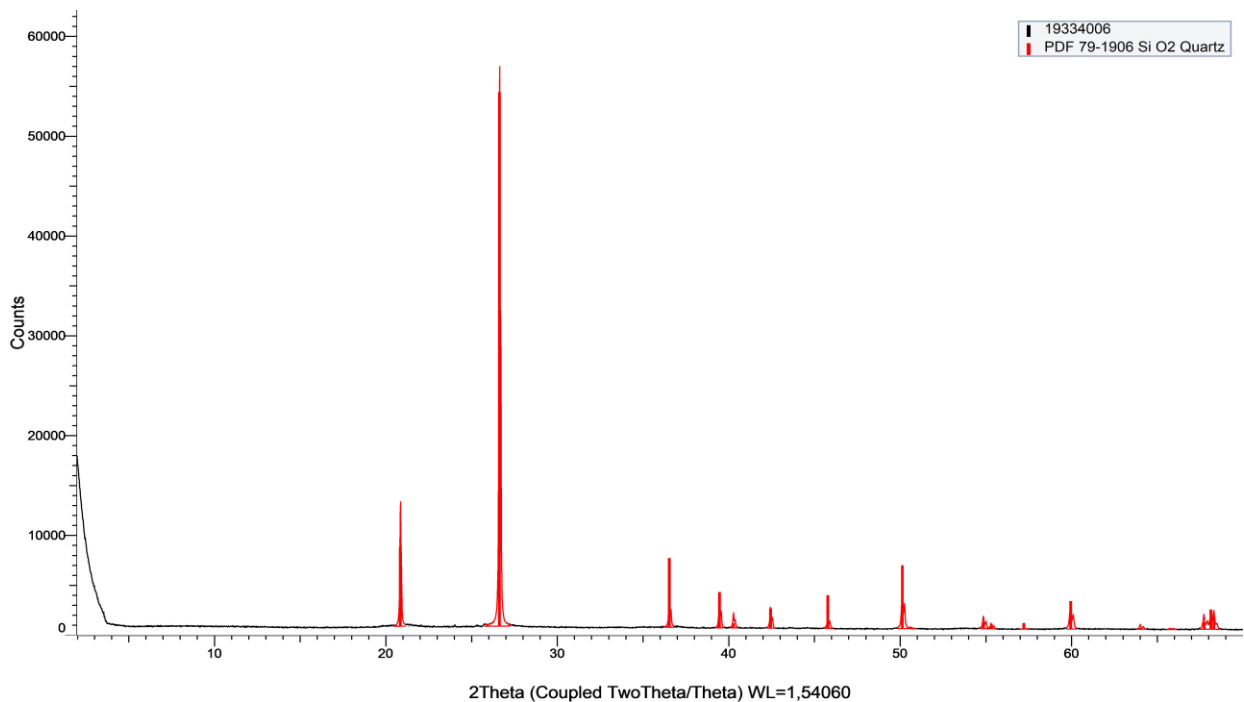
El análisis por difracción de rayos X es un método analítico estructural que permite determinar los compuestos presentes en una muestra por su estructura cristalina. Un mineral, al estar compuesto por átomos con una estructura ordenada producirá un diagrama de difracción característico. Los sedimentos pueden estar compuestos de varios minerales, por lo que el diagrama de difracción será una combinación de los correspondientes a las sustancias presentes en dicho sedimento. Los diagramas de difracción se generan cuando el haz de rayos X choca con los átomos de la estructura cristalina reflejándolos con cierto ángulo e intensidad y al analizar estos valores se puede inferir qué tipo de compuesto fue en el que incidió el rayo (Melgarejo, Proenza, Galí, & Llovet, 2010)

Una vez obtenidos los resultados se procedió a realizar los respectivos análisis mediante el programa DIFFRAC.EVA, el cual es un software que proporciona las herramientas necesarias para

identificar los picos y las fases minerales comparando los patrones de difracción de las muestras con las bases de datos incluidas en el programa. Las bases de datos usadas para las consultas en el proyecto de investigación fueron del año 2004, así, las diez muestras analizadas por difracción fueron caracterizadas por medio del programa como se observa en la figura 4. En el anexo A se encuentran consignados los demás patrones de difracción.

#### Figura 4

*Diagrama de difracción de la muestra P7-C tratado mediante el software DIFFRAC.EVA*



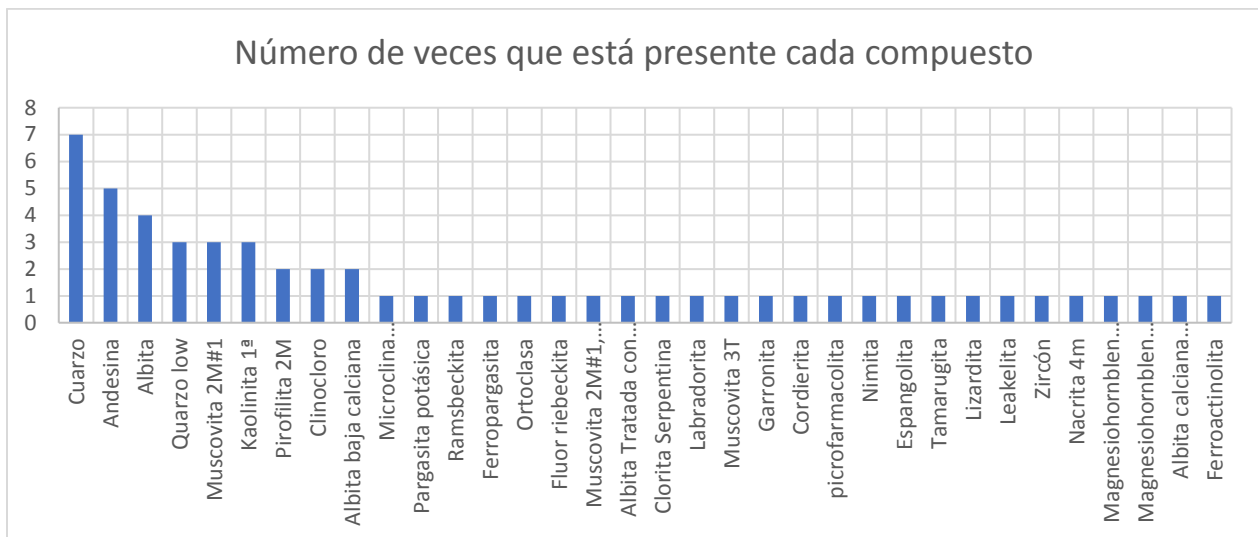
Nota. En el grafico se puede observar el patrón de difracción de la muestra P7-C. Las líneas rojas indican el patrón de difracción del cuarzo, el cual concuerda con el patrón descrito por la muestra de sedimento.

Los sedimentos del río Magdalena analizados por medio de DIFFRAC.EVA presentaron diferentes patrones de difracción. En la figura 5 se puede apreciar que el mineral más frecuentemente encontrado en las diferentes muestras de sedimentos del sector de estudio fue el cuarzo, seguido por la albita y la andesina resaltando que una de las muestras únicamente presentó

cuarzo en su estructura mineralógica como se observa en la figura 4. En el anexo B se presenta una tabla con los minerales presentes en las siete muestras de sedimentos.

**Figura 5**

*Minerales presentes y su recurrencia en las muestras de sedimentos extraídas del río Magdalena*



Nota. Minerales presentes y su recurrencia en las muestras de sedimentos extraídas del río Magdalena.

Se encuentra que para las muestras únicamente tamizadas el número de minerales presentes tiende a ser mayor que para las molidas como se puede evidenciar en la tabla 2, además de la aparente presencia de diferentes minerales en el mismo sedimento como se observa en la muestra P6. Según Esteve, (2006) el tamaño de partícula es un parámetro importante para obtener precisión en los datos de difracción, es recomendable realizar un proceso de molienda para tener un tamaño de partículas homogéneo, aunque dependerá de la naturaleza de los componentes. De acuerdo con el autor, el tamizado no asegura esta homogeneidad en el tamaño de partícula requerido para el análisis difracción, lo que podría explicar las diferencias en los resultados obtenidos para la misma muestra de sedimentos, con diferente pretratamiento. Además, su aplicación no es aconsejable porque puede provocar alteración en las relaciones de las fases.

**Tabla 2**

*Comparación en la cantidad y tipo de minerales presentes en las muestras molidas y no molidas.*

| <b>Código</b>                   | <b>5</b>                        | <b>6</b>             | <b>7</b>             | <b>8</b>  | <b>10</b>              | <b>9</b>    |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|-------------|
| <b>Nombre</b>                   | <b>P2<br/>ORILLA<br/>Molida</b> | <b>P2<br/>ORILLA</b> | <b>P6<br/>Molida</b> | <b>P6</b> | <b>P7 C<br/>Molida</b> | <b>P7 C</b> |
| <b>Cuarzo</b>                   | <b>X</b>                        | <b>X</b>             | <b>X</b>             | <b>X</b>  |                        | <b>X</b>    |
| <b>Andesita</b>                 |                                 |                      | <b>X</b>             |           |                        |             |
| <b>Albita</b>                   |                                 | <b>X</b>             | <b>X</b>             |           |                        |             |
| <b>Quarzo low</b>               |                                 |                      |                      |           | <b>X</b>               |             |
| <b>Muscovita 2M#1</b>           |                                 |                      | <b>X</b>             |           |                        |             |
| <b>Kaolinita 1ª</b>             |                                 | <b>X</b>             |                      | <b>X</b>  |                        | <b>X</b>    |
| <b>Pirofilita 2M</b>            |                                 |                      | <b>X</b>             | <b>X</b>  |                        |             |
| <b>Clinocloro</b>               |                                 | <b>X</b>             | <b>X</b>             |           |                        |             |
| <b>Albita baja calciana</b>     | <b>X</b>                        |                      |                      |           |                        |             |
| <b>Albita Tratada con calor</b> |                                 |                      |                      | <b>X</b>  |                        |             |
| <b>Clorita Serpentina</b>       |                                 |                      |                      | <b>X</b>  |                        |             |
| <b>Labradorita</b>              |                                 |                      |                      | <b>X</b>  |                        |             |
| <b>Muscovita 3T</b>             |                                 |                      |                      | <b>X</b>  |                        |             |
| <b>Garronita</b>                |                                 |                      |                      | <b>X</b>  |                        |             |
| <b>Cordierita</b>               |                                 |                      |                      | <b>X</b>  |                        |             |
| <b>Picrofarmacolita</b>         |                                 |                      |                      |           |                        | <b>X</b>    |
| <b>Nimita</b>                   |                                 |                      |                      |           |                        | <b>X</b>    |
| <b>Espangolita</b>              |                                 |                      |                      |           |                        | <b>X</b>    |
| <b>Tamarugita</b>               |                                 |                      |                      |           |                        | <b>X</b>    |
| <b>Lizardita</b>                |                                 |                      |                      |           |                        | <b>X</b>    |
| <b>Leakelita</b>                |                                 |                      | <b>X</b>             |           |                        |             |

|                                   |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Zircón</b>                     |          |          | <b>X</b> |          |          |          |
| <b>Nacrita 4m</b>                 |          |          | <b>X</b> |          |          |          |
| <b>Magnesiohornblende</b>         |          | <b>X</b> |          |          |          |          |
| <b>Magnesiohornblende ferroan</b> |          | <b>X</b> |          |          |          |          |
| <b>TOTAL</b>                      | <b>2</b> | <b>7</b> | <b>9</b> | <b>9</b> | <b>1</b> | <b>7</b> |

Nota. Comparación en la cantidad y tipo de minerales presentes en las muestras molidas y no molidas.

#### **4.2. Comportamiento esperado de las partículas, mediante revisión de literatura científica (Fase II)**

Numerosos experimentos se han realizado en búsqueda de identificar los efectos del tipo de mineral en la formación de los agregados crudo-partículas. Se ha encontrado que la formación de los OPAS se ve afectada por las propiedades físicas y químicas de los minerales, como lo son la hidrofobicidad, capacidad de intercambio de cationes, propiedades de superficie y espacios disponibles entre capas (Stoffyn-Egli & Lee, 2002).

Las distintas propiedades de los minerales llegan a cambiar la forma, el tipo e incluso la flotabilidad de los agregados que forman así como la estabilidad del OPA (Loh et al., 2014). Se realizó una revisión bibliográfica en las diferentes bases de datos académicas con el fin de identificar las propiedades de la formación de agregados crudo partículas en un medio acuoso. A continuación, se presentan las principales características de la interacción crudo-partículas registradas en la literatura.

##### **4.2.1. Presencia de materia orgánica en los sedimentos.**

Las gotas de crudo pueden unirse tanto a partículas orgánicas como inorgánicas. En cuanto a partículas orgánicas, estas se unen a microorganismos y compuestos orgánicos producidos por

bacterias y algas (K. Lee et al., 1985). En ambientes marinos, la interacción de las partículas orgánicas (conocidas como nieve marina) con el crudo emulsificado forma agregados de tamaños mayores a los 0.5 mm (Boglaienko & Tansel, 2018; Passow, Ziervogel, Asper, & Diercks, 2012). Por otra parte, en ambientes rivereños la presencia de detrito orgánico es algo usual (fragmentos de hojas, tallos, ramas, entre otros). Experimentos realizados por Waterman & García, (2015) con sedimentos orgánicos e inorgánicos del río Kalamazoo demostraron que los detritos orgánicos al entrar en contacto con glóbulos de crudo se adhieren a la superficie de las gotas generando agregados crudo-partículas. De acuerdo con el autor, el crudo no presentó ninguna preferencia entre los sedimentos inorgánicos y las partículas orgánicas, aunque sí hubo afinidad hacia partículas filamentosas de posible procedencia orgánica.

#### ***4.2.2. Carácter hidrofílico o hidrofóbico de las partículas.***

La cantidad de agregados formados, es decir, la interacción entre las partículas minerales y las gotas de crudo se ve afectada por la hidrofobicidad del mineral (Wang, Zheng, & Lee, 2013). La formación de OPAS con materia inorgánica ha sido ampliamente estudiada, especialmente aquella relacionada con los minerales asociados a los sedimentos presentes en un cuerpo de agua (Niu, Li, Lee, Kepkay, & Mullin, 2011; Stoffyn-Egli & Lee, 2002). La salinidad e hidrofobicidad juegan un papel importante en la interacción entre minerales y gotas de crudo (Loh et al., 2014). El efecto de la salinidad está ligado al tipo de mineral y su carga electrostática (Sun, Zheng, Sun, & Ph, 2009). Por otra parte, los espacios en la superficie de los minerales permiten la penetración de moléculas de agua en ellos incrementando la afinidad por compuestos orgánicos del hidrocarburo facilitando la unión del crudo al mineral (Theng, 1974)

La superficie de la mayoría de las partículas en aguas naturales está cargada negativamente así como las partículas de crudo, a medida que aumenta la salinidad, dicha carga disminuye favoreciendo la atracción entre las superficies de las partículas del medio generando mayor cantidad OPAS (A. Khelifa, Stoffyn-Egli, Hill, & Lee, 2005). En ríos, la presencia de iones provenientes de sedimentos minerales beneficia la formación de los agregados, así mismo, estudios realizados por (A. Khelifa et al., 2005) encontraron una relación empírica con variables adimensionales entre la salinidad y la distribución de tamaño de los OPAS generados como se observa en la ecuación (1), además de la estrecha relación entre la salinidad y el tipo de mineral presente en los sedimentos.

$$\frac{N}{N_T} = f\left(\frac{D}{D_{50}}\right) \quad (1)$$

Donde:

$N$ : Concentración de gotas con tamaño  $D$

$N_T$ : Concentración total de gotas

$D$ : Tamaño de gota

$D_{50}$ : Tamaño medio de gota

Los resultados encontrados por el autor mostraron que se necesita un valor mínimo entre 1.2 a 3.5 ppt de salinidad para la formación de agregados crudo-partículas estables además de formarse opas de forma más alargada. Esto puede deberse a que el agua salada actúa como un ion intermediario entre la interacción de las partículas y el crudo aumentando la carga eléctrica de ambos favoreciendo el potencial de atracción entre ellos (Loh et al., 2014). Sin embargo, grandes valores de salinidad disminuirán el tamaño de la gota de crudo

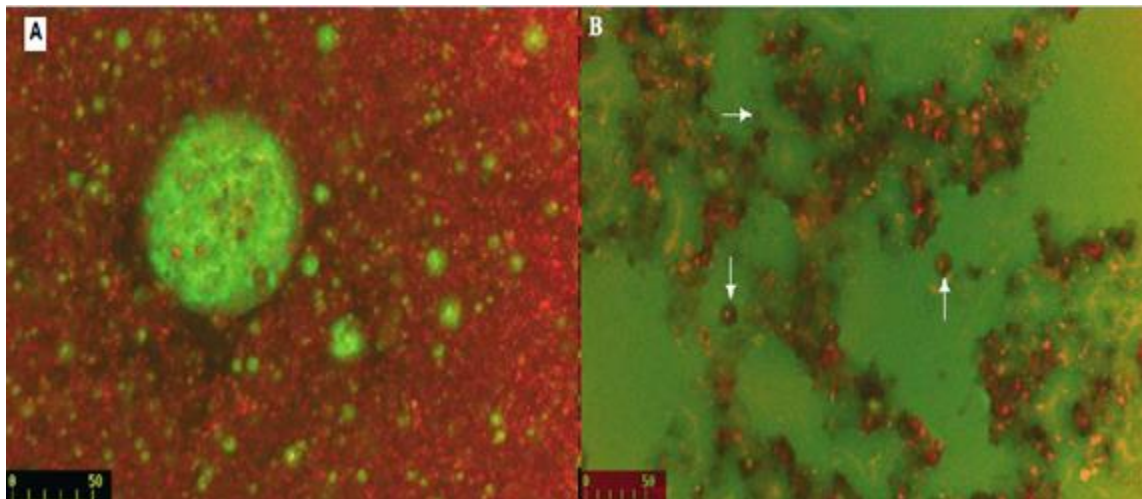
De igual forma, Cao, Yang, Wei, & Han, (2011) Realizó una investigación en la cual se estudia la sorción de crudo pesado en un sedimento cuya composición cuenta con un 51% de cuarzo. Los

resultados lograron demostrar que la sorción aumenta al incrementar las concentraciones de NaCl, mostrando un efecto positivo en la sorción dificultando la reentrada de materia orgánica en el sedimento.

Por otro lado, la hidrofobicidad también es un factor clave en la formación de agregados crudo-partículas. Mediante la modificación de la caolinita y el uso de diversos minerales Omotoso, Munoz, & Mikula, (2002) estudiaron los mecanismos involucrados en la interacción del crudo con estos minerales. En sus experimentos dedujeron que minerales hidrofílicos interactúan con gotas de crudo estables, mientras que, minerales oleofílicos como los carbonatos no necesitan que el crudo se encuentre en una fase dispersa para poder interactuar con éste. Además, los minerales hidrofílicos como el cuarzo y la caolinita cuando interactúan con crudos de baja viscosidad forman agregados crudo partículas con flotabilidad negativa como se ve en la figura 6.

### Figura 6

*Microscopía de laser confocal de agregados crudo partículas formados por cuarzo y calcita.*



Nota. En (A) la fase continua es agua, las gotas de crudo (verde) están rodeadas por gran cantidad de partículas de cuarzo (rojo). En (B) la calcita (rojo) se encuentra en una fase continua de crudo (verde). Las flechas indican gotas de agua atrapadas en los agregados formados por el mineral. Adaptado de (Omotoso et al., 2002)

Así mismo, H. Zhang et al., (2010), trabajó con ceniza, grafito, diatomita y caolinita, modificando la hidrofobicidad de esta última para estudiar su rol en la interacción de los minerales con el petróleo encontrando que aumentando ligeramente la hidrofobicidad se mejora la adhesión entre el mineral y las gotas de crudo. No obstante, una hidrofobicidad grande hacía que las partículas minerales se unieran entre sí y no interactuaran con el hidrocarburo. Además de esto, H. Zhang et al., (2010) analizó la estructura de los agregados crudo partícula que se formaron con los minerales mencionados anteriormente donde observaron que minerales hidrofóbicos formaban OPAS de formas largas e irregulares.

#### ***4.2.3. Tipo de minerales***

El cuarzo ha sido usado en distintos estudios para identificar las propiedades de los OPAS formados (A. Khelifa et al., 2005; Omotoso et al., 2002; Stoffyn-Egli & Lee, 2002). Uno de los factores que afecta en la interacción entre los minerales y el crudo es la capacidad de intercambio de cationes que es la habilidad que tiene un mineral de intercambiar las cargas eléctricas de su superficie afectando las propiedades de unión entre minerales y el crudo. Cada mineral tiene sus propiedades únicas y afectan de forma diferente la formación de los OPAS (Loh & Yim, 2016)

De acuerdo a la revisión bibliográfica se encontró que gran mayoría de investigaciones usan el cuarzo, la kaolinita y la montmorillonita en sus estudios de interacción de minerales con hidrocarburos (A. Khelifa, Stoffyn-Egli, Hill, & Lee, 2002; Kenneth Lee, 2002; Omotoso et al., 2002; Stoffyn-egli et al., 2003; H. Zhang et al., 2010) Esto se debe a que dichos minerales están presentes en ambientes marinos (Loh & Yim, 2016).

Por otra parte, Kenneth Lee et al., (2002) analizó la mineralogía presente en los sedimentos del río Desaguadero en Bolivia donde evidenció la presencia de minerales arcillosos en las muestras del

río. No obstante, en sus experimentos no estudiaron la influencia individual del tipo de mineral en la formación de OPAS.

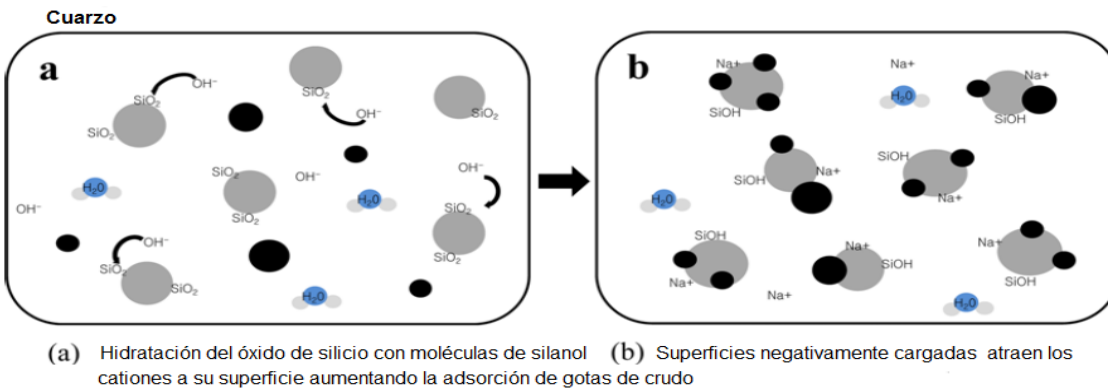
Los estudios relacionados con la interacción del crudo con partículas minerales provenientes de ríos son limitados y hubo poca información acerca de los minerales encontrados en las muestras de sedimentos del río Magdalena.

En los análisis de difracción de rayos X se encuentra que el mineral cuarzo está presente en todas las muestras analizadas, el análisis de P7-C molido arrojó que la muestra está compuesta en su totalidad de este mineral, por lo cual, la información presentada a continuación se enfocará en describir las características de la formación de OPAS basado en investigaciones anteriores relacionadas con dicho mineral.

**4.2.3.1 Cuarzo** La arena de cuarzo es un mineral hidrofílico con superficies no polares protonadas, en el agua de mar su superficie se hidrata y se cubre por completo con grupos de silanol. Las moléculas de agua se absorben en estos grupos y las moléculas orgánicas polares pueden retenerse mediante enlaces de hidrógeno. Las moléculas de silanol en la superficie del mineral lo cargan negativamente por lo cual atraerá cationes inorgánicos u orgánicos (Iler, 1979) como se puede observar en la figura 7. Las partículas de cuarzo se encontrarán con un recubrimiento hidrófobo discontinuo sobre su superficie, favoreciendo la unión a las gotas de aceite, dando resultado a la formación de agregados crudo-partículas minerales (Stoffyn-Egli & Lee, 2002)

### **Figura 7**

*Interacciones entre las partículas minerales de cuarzo y el crudo en un ambiente marino.*



Nota. Adaptado de (Loh & Yim, 2016)

Stoffyn-Egli & Lee, (2002) en su experimentación comparó la forma de los agregados haciendo uso de diferentes minerales y tipos de crudo. Para el caso del cuarzo, en todas las pruebas el agregado tomó la forma de gota con la característica de tener menos granos minerales que en los agregados que se asentaban. Loh & Yim, (2016) mencionan que la flotabilidad de los agregados crudo partícula formados con este mineral puede ser positiva o negativa dependiendo de la cantidad de partículas en su superficie.

En otros estudios se respalda la forma del OPA al interactuar con cuarzo. W. Zhang et al., (2019) en su experimentación, hicieron uso de  $ZrO_2$  con tamaños de partícula de 30 a 250  $\mu m$  y  $SiO_2$  con tamaños de partícula de 75 a 500  $\mu m$ . Se encontró que a pesar de que el  $SiO_2$  tiene un tamaño de partícula mayor, la forma de la OPA presentada es del tipo gota de crudo recubierta con partículas, mientras que para el mineral con tamaño de grano menor  $ZrO_2$ , la OPA tomó la configuración de gota de crudo rellena de partículas.

Además W. Zhang et al., (2019) estudió los parámetros físicos involucrados en la formación de OPAS en el ambiente marino, haciendo uso de un sedimento principalmente compuesto por cuarzo, en el cual se tuvo en cuenta los diferentes tamaños de grano. En este estudio se encontró que cuando los sedimentos tienen un tamaño inferior a 100  $\mu m$  los OPAS formados están

configurados como gotas de crudo recubiertas por partículas, mientras que para tamaños superiores a 100  $\mu\text{m}$  se observaron partículas grandes de sedimento rodeadas por pequeñas gotas de crudo. Omotoso et Al., (2002) realizó un amplio estudio relacionado con la interacción crudo y partículas minerales analizando tres tipos de mineral: calcita, kaolinita y el cuarzo en agua de mar y dulce. En los resultados encontrados por el autor se observó que las partículas de cuarzo formaban flóculos de flotabilidad negativa estables con las gotas de crudo evitando la coalescencia de dichas gotas. Además, también estudió el efecto de la química del agua en la formación de los OPAS dónde pudo determinar que en agua dulce al tener una fuerza iónica baja (debido a la baja salinidad) las cargas eléctricas superficiales del mineral juegan un rol importante en las interacciones crudo-partícula. Para el caso del cuarzo, al tener una superficie protonada no polar, este tiende a ser oleofílico lo que será más propenso a interactuar con las gotas de crudo en agua dulce que en agua salada. Finalmente, el autor concluye que la superficie del mineral es una propiedad importante para estudiar las interacciones entre crudo y el mineral, incluso más que el tamaño de partícula. Minerales con bajas áreas superficiales como el cuarzo interactúan menos que con el crudo, pero tendrán mayor afinidad con el crudo en agua dulce que los minerales arcillosos en un rango de tamaño de partícula similar.

**4.2.3.1 Otros minerales** En cuanto a otros minerales presentes en un medio acuoso, son limitados los experimentos que han estudiado el efecto de estos en la formación de OPAS y en su mayoría son utilizados aquellos que se encuentran en gran proporción en ambientes marinos. La kaolinita es un mineral que se encuentra comúnmente en mares, es hidrofílico con propiedades polares negativas en su superficie promoviendo la adsorción de cationes y moléculas orgánicas, en esta investigación este mineral fue encontrado en las muestras P2 orilla, P6 y P7-C únicamente tamizados En sus pruebas de laboratorio A. Khelifa et al., (2002) encontró que este mineral

formaba OPAS de flotabilidad positiva siendo estas una gota de crudo generalmente grande rodeada de pocos granos minerales, sin embargo, con aceites ligeros puede formar agregados de flotabilidad negativa. El autor menciona que el mineral no es muy eficiente para capturar las gotas de crudo comparado con otros minerales.

Otro mineral comúnmente estudiado es la montmorillonita, de carácter hidrofílico y con superficie fuertemente polar. Al contrario que el cuarzo, Omotoso et al., (2002) descubrió que la interacción de este mineral con el crudo es más fuerte en agua salada. Esto se debe a la carga eléctrica del mar (iones positivos de sodio) y su estructura molecular, la cual posee espacios moleculares expandibles que pueden ser ocupados por iones orgánicos polares presentes en el crudo. Debido a la competencia entre moléculas para ocupar los espacios disponibles dentro del mineral, la forma que toman los agregados crudo partícula con este mineral son generalmente de tipo escama de flotabilidad positiva o neutra. Minerales como la vermiculita y la esmectita tienen un comportamiento y tendencia similar a la montmorillonita (Stoffyn-egli et al., 2003). En las muestras del sector de estudio no se encontró ninguno de estos minerales, sin embargo, la pirofilita, encontrada en las muestras P6 tanto molida como únicamente tamizada pertenece al mismo grupo de los minerales anteriores, lo que daría una noción de cómo podría comportarse este mineral con el crudo derramado.

La calcita, contrario a los minerales anteriores, es oleofílica con superficies protonadas no polares. Esta característica permite relacionarse con el hidrocarburo sin importar la viscosidad de este, además, la calcita interactúa con el crudo con mejor efectividad en agua dulce como lo verificaron Omotoso et al., (2002) en sus estudios. De acuerdo con las pruebas realizadas por el autor, los agregados crudo partícula formados con calcita son del tipo gota única o múltiple y pueden presentarse en las dos fases, la fase continua de agua y la de crudo. En la fase acuosa se puede

presentar gran cantidad de gotas de crudo deformes debido a la penetración del mineral en el glóbulo y en la fase oleosa se forma algo similar a una emulsión donde las gotas de agua están enredadas con el crudo y las partículas minerales.

## 5. Conclusiones

- De las diez muestras de sedimentos analizadas por difracción de rayos X se identificaron 34 tipos de minerales donde el cuarzo, la albita y la andesina fueron los más frecuentes encontrándose en diez, siete y cinco muestras respectivamente.
- Se evidencio la diferencia en los resultados de los análisis de difracción entre las muestras molidas y las únicamente tamizadas, ya que para un mismo sedimento el patrón de difracción resultante es diferente en los dos métodos de preparación de la muestra. Según Esteve (2006) esto posiblemente se debe a que el tamizado puede provocar alteraciones en la proporción de las fases minerales ya que partículas de estos quedan retenidas en el tamiz, mientras que la molienda asegura homogeneidad del tamaño de partículas.
- El área superficial de un mineral es un factor importante en la adsorción de crudo, ya que, según los resultados encontrados en la revisión bibliográfica, la formación y el tipo de agregado crudo partícula se verá influenciada por esta.
- La salinidad es un parámetro ambiental importante en la formación de OPAS. Diversos autores concuerdan en que se necesita un valor mínimo de salinidad para la formación de OPAS(Guyomarch, et al., 2002; Le Floch et al., 2002). De acuerdo con (A. Khelifa et al., 2005) este valor está en un rango de 1.2 a 3.5 ppt. Lah
- La hidrofobicidad es un factor que puede favorecer la formación de OPAS ya que promueve la afinidad de los minerales con el crudo, sin embargo, según H. Zhang et al.,

(2010) una alta hidrofobicidad puede hacer que las partículas minerales se unan entre sí y se sedimenten antes de interactuar con el crudo.

- En la revisión de la literatura relacionada con la formación de agregados crudo-partículas se evidenció la poca información respecto a la interacción entre el hidrocarburo y partículas inorgánicas en agua dulce.
- Dentro de los estudios realizados por diversos autores se encontró que el cuarzo forma agregados crudo-partícula con forma de gota, lo que da una noción de cómo podría comportarse el sedimento con el crudo al haber presencia de este mineral en las muestras de sedimentos del sector de estudio.

## **6. Recomendaciones**

- Al caracterizar las muestras de sedimentos se recomienda incluir pruebas complementarias además de la difracción de rayos X como el análisis elemental para estimar la composición porcentual de los elementos presentes en los minerales de dichas muestras mejorando la precisión en el reconocimiento de los patrones de difracción mediante el software DIFFRAC EVA.
- Los patrones de difracción de las muestras de sedimentos estudiadas evidenciaron la diversa cantidad de minerales presentes en el río Magdalena, no obstante, durante la revisión bibliográfica se encontró poca o nula información de la gran mayoría de estos minerales y su interacción con el crudo. Se recomienda seguir evaluando el efecto de los diferentes minerales en la formación de agregados crudo-partículas a nivel de laboratorio.

- Originalmente el presente trabajo de grado buscaba evaluar el efecto de la composición mineralógica de las partículas en la formación de agregados crudo-partículas mediante experimentación a nivel de laboratorio con matraces deflectores simulando las condiciones de un río. Sin embargo, debido a las circunstancias de la pandemia causada por el COVID-19 se debió reformular el alcance del proyecto. Se recomienda seguir con el estudio usando dicha prueba.

**Referencias Bibliográficas**

- Aguilera, F., Méndez, J., & Laffon, B. (2010). Review on the effects of exposure to spilled oils on human health. *Journal of Applied Toxicology*, (April), 291–301. <https://doi.org/10.1002/jat.1521>
- Baker, J. M., Clark, R. B., Kingston, P. F., & Jenkins, R. H. (1990). Natural recovery of cold water marine environments after an oil spill. *Proceedings of the Thirteenth Annual Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, (June), 1–111.
- Bandara, U. C., Yapa, P. D., & Xie, H. (2011). Fate and transport of oil in sediment laden marine waters. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5(3), 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2011.03.002>
- Boglaienko, D., & Tansel, B. (2018). Classification of oil–particle interactions in aqueous environments: Aggregate types depending on state of oil and particle characteristics. *Marine Pollution Bulletin*, 133(November 2017), 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.037>
- Boufadel, M. C., Lee, K., & Bejarano, A. C. (2015). *Oil-Particle Interactions and Submergence from Crude Oil Spills in Marine and Freshwater Environments* —. (June). <https://doi.org/10.3133/ofr20151076>
- Cao, X., Yang, G., Wei, S., & Han, H. (2011). Sorption of heavy oil onto Jiaozhou Bay sediment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(4), 741–746. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.01.016>
- Castro, A., & Pinilla, J. (2017). *Evaluación del rendimiento de adsorción del aserrín en diferentes tamaños de grano para contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos*. Universidad Industrial de Santander.
- Cook, N. J. (2000). *Mineral characterisation of industrial mineral deposits at the Geological Survey of Norway : a short introduction*. 189–192.
- Delevigne, G., & Sweeney, C. (1988). *Natural Dispersion of Oil*. 4, 281–310.
- Esteve, V. (2006). *El método Rietveld*.
- Fingas, M. (2015). Handbook of Oil Spill Science and Technology. In *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. <https://doi.org/10.1002/9781118989982>

- Fitzpatrick, F. A., Boufadel, M. C., Johnson, R., Lee, K., Graan, T. P., Bejarano, A. C., ... Garcia, M. H. (2015). Oil-Particle Interactions and Submergence from Crude Oil Spills in Marine and Freshwater Environments— Review of the Science and Future Science Needs. *U.S. Geological Survey*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3133/ofr20151076>.
- Gong, Y., Zhao, X., Cai, Z., O'Reilly, S. E., Hao, X., & Zhao, D. (2014). A review of oil, dispersed oil and sediment interactions in the aquatic environment: Influence on the fate, transport and remediation of oil spills. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1–2), 16–33. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.12.024>
- Guyomarch, J., Le Floch, S., & Merlin, F. X. (2002). Effect of suspended mineral load, water salinity and oil type on the size of oil–mineral aggregates in the presence of chemical dispersant. *Spill Science and Technology Bulletin*, 8(1), 95–100. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00118-4)
- Ibarra-mojica, D. M., Barajas-ferreira, C., Kafarov, V., Forero, J., & Duran, D. F. (2018). Application of Free Software ( GNOME ) for Simulation of Oil Spills Trajectories in a Sector of Magdalena River ( Colombia ). *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1171–1176. <https://doi.org/10.3303/CET1870196>
- Iler, R. k. (1979). *The chemistry of silica*. New York: John Wiley & Sons.
- International Petroleum Industry Environmental Conservation Association. (1991). Guidelines on Biological Impacts of Oil Pollution. *IPIECA Report Series*.
- Khelifa, A., Stoffyn-Egli, P., Hill, P. S., & Lee, K. (2002). Characteristics of oil droplets stabilized by mineral particles: Effects of oil type and temperature. *Spill Science and Technology Bulletin*, 8(1), 19–30. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00117-2)
- Khelifa, A., Stoffyn-Egli, P., Hill, P. S., & Lee, K. (2005). Effects of salinity and clay type on oil-mineral aggregation. *Marine Environmental Research*, 59(3), 235–254. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2004.05.003>
- Khelifa, D. A., Fingas, M., Brown, C. (2008). Effects of dispersants on oil-SPM aggregation and fate in US coastal waters. *Final Report Grant Number: NA04NOS4190063*, 2006–2007. Retrieved from [http://www.circac.org/wp-content/uploads/AliKhelifa\\_FinalReport\\_NoAppendices.pdf](http://www.circac.org/wp-content/uploads/AliKhelifa_FinalReport_NoAppendices.pdf) <http://www.crrc.unh.edu/final/khelifafinal2008/> <https://www.circac.org/wp-content/uploads/Appendices.pdf>

- Kingston, P. F. (2002). Long-term Environmental Impact of Oil Spills. *Spill Science & Technology Bulletin*, 7(02), 53–61.
- Le Floch, S., Guyomarch, J., Merlin, F. X., Stoffyn-Egli, P., Dixon, J., & Lee, K. (2002). The influence of salinity on oil-mineral aggregate formation. *Spill Science and Technology Bulletin*, 8(1), 65–71. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00124-X](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00124-X)
- Lee, K., Wong, C. S., Cretney, W. J., Whitney, F. A., Parsons, T. R., Lalli, C. M., & Wu, J. (1985). Microbial response to crude oil and Corexit 9527: SEAFLEXES enclosure study. *Microbial Ecology*, 11(4), 337–351. <https://doi.org/10.1007/BF02016816>
- Lee, Kenneth. (2002). Oil-particle interactions in aquatic environments: Influence on the transport, fate, effect and remediation of oil spills. *Spill Science and Technology Bulletin*, 8(1), 3–8. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(03\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(03)00006-9)
- Lee, Kenneth, Stoffyn-Egli, P., & Owens, E. H. (2002). The OSSA II pipeline oil spill: Natural mitigation of a riverine oil spill by oil-mineral aggregate formation. *Spill Science and Technology Bulletin*, 7(3–4), 149–154. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00056-7](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00056-7)
- Loh, A., Shim, W. J., Ha, S. Y., & Yim, U. H. (2014). Oil-suspended particulate matter aggregates: Formation mechanism and fate in the marine environment. *Ocean Science Journal*, 49(4), 329–341. <https://doi.org/10.1007/s12601-014-0031-8>
- Loh, A., & Yim, U. H. (2016). A Review of the Effects of Particle Types on Oil-suspended Particulate Matter Aggregate Formation. *Ocean Science Journal*, 51(4), 535–548. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s12601-016-0050-8>
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1–23. <https://doi.org/10.18268/BSGM2010v62n1a1>
- Mendelssohn, I. A., Andersen, G. L., Baltz, D. M., Caffey, R. H., Carman, K. R., Fleeger, J. W., ... Rozas, L. P. (2012). Oil Impacts on Coastal Wetlands: Implications for the Mississippi River Delta Ecosystem after the Deepwater Horizon Oil Spill. *BioScience*, 62(6), 562–574. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.6.7>
- Miranda, D., & Restrepo, R. (2004). *LOS DERRAMES DE PETROLEO EN ECOSISTEMAS TROPICALES - IMPACTOS, CONSECUENCIAS Y*. 571–576.
- Niu, H., Li, Z., Lee, K., Kepkay, P., & Mullin, J. V. (2011). Modelling the Transport of Oil-

- Mineral-Aggregates (OMAs) in the Marine Environment and Assessment of Their Potential Risks. *Environmental Modeling and Assessment*, 16(1), 61–75. <https://doi.org/10.1007/s10666-010-9228-0>
- Omotoso, O. E., Munoz, V. A., & Mikula, R. J. (2002). Mechanisms of Crude Oil-Mineral Interactions. *Spill Science and Technology Bulletin*, 8(1), 45–54. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00116-0](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00116-0)
- Passow, U., Ziervogel, K., Asper, V., & Diercks, A. (2012). Marine snow formation in the aftermath of the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico. *Environmental Research Letters*, 7(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/035301>
- Spaulding, M. L. (2017). State of the art review and future directions in oil spill modeling. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1–2), 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.001>
- Stoffyn-Egli, P., & Lee, K. (2002). Formation and characterization of oil - Mineral aggregates. *Spill Science and Technology Bulletin*, 8(1), 31–44. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00128-7](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00128-7)
- Stoffyn-egli, P., Lee, K., Box, P. O., & Bj, C. (2003). Formation and Characterization of Oil – Mineral Aggregates. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(1), 31–44. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00128-7](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00128-7)
- Sun, J., Zheng, X., Sun, J., & Ph, D. (2009). A review of oil-suspended particulate matter aggregation — a natural process of cleansing spilled oil in the aquatic environment. *Journal of Environmental Monitoring*, 1801–1809. <https://doi.org/10.1039/b904829b>
- Wang, W., Zheng, Y., & Lee, K. (2013). Role of the hydrophobicity of mineral fines in the formation of oil-mineral aggregates. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(4), 698–703. <https://doi.org/10.1002/cjce.21780>
- Waterman, D., & García, M. (2015). *Laboratory Tests of Oil-Particle Interactions in a Freshwater Riverine Environment with Cold Lake Blend Weathered Bitumen*.
- Weise, A. M., Nalewajko, C., & Lee, K. (1999). Oil-mineral fine interactions facilitate oil biodegradation in seawater. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 20(8), 811–824. <https://doi.org/10.1080/09593332008616877>
- Yapa, P. D., & Shen, H. T. (1994). Modelling river oil spills : a review Modelling river oil spills. *Journal of Hydraulic Research*, (March 2013), 37–41.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/00221689409498713>

Zhang, H., Khatibi, M., Zheng, Y., Lee, K., Li, Z., & Mullin, J. V. (2010). Investigation of OMA formation and the effect of minerals. *Marine Pollution Bulletin*, 60(9), 1433–1441.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.05.014>

Zhang, W., Yu, X., Zhang, J., & Wang, Y. (2019). Study of oil-particle-aggregation by digital inline holograph. *Geosciences Journal*, 23(3), 461–469.

Zhu, Z., Waterman, D., & García, M. (2018). Modeling the transport of oil – particle aggregates resulting from an oil spill in a freshwater environment. *Environmental Fluid Mechanics*.

<https://doi.org/10.1007/s10652-018-9581-0>

Apéndices

Apéndice A. Resultados De Análisis De Difracción De Rayos X

Figura A.1 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P1 molido.

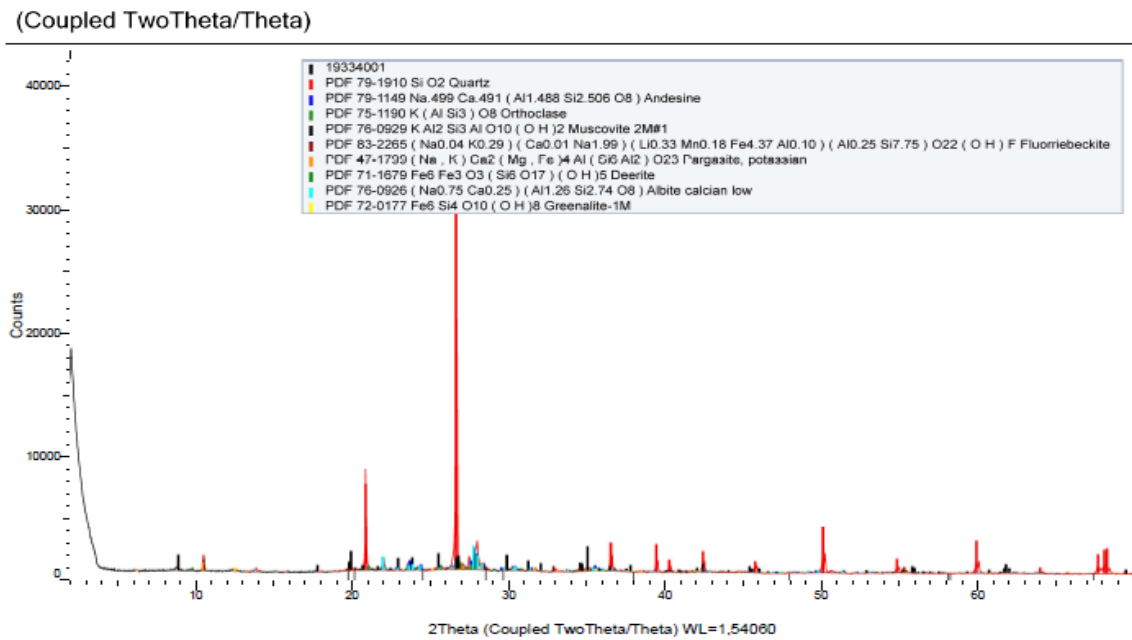


Figura A.2 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P2 molido.

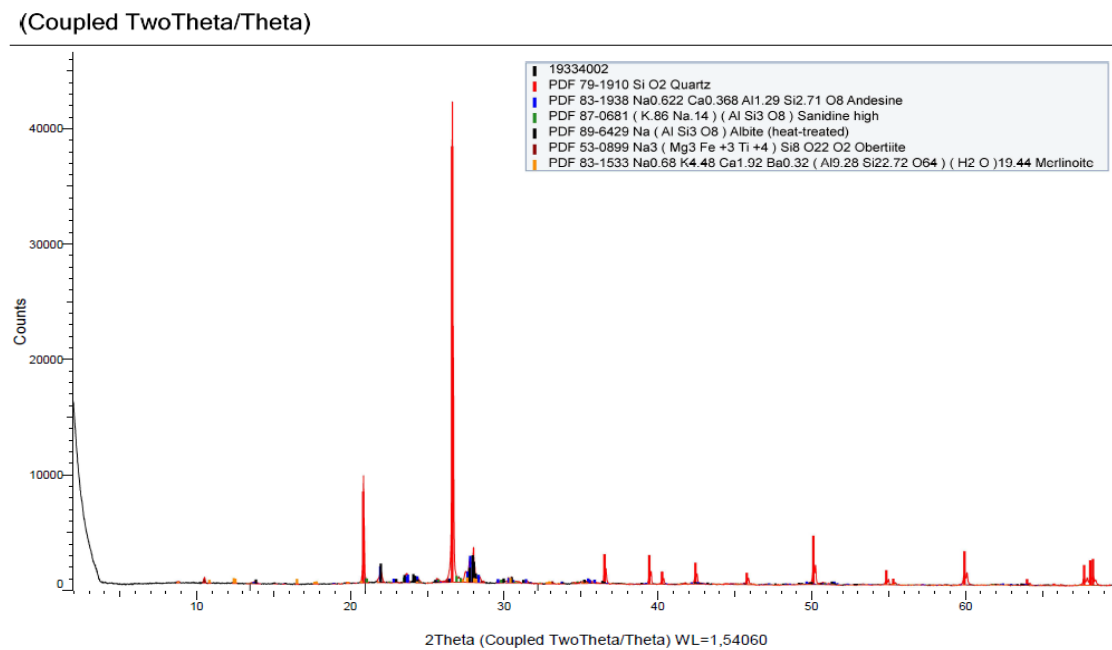


Figura A.3 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P6.

(Coupled TwoTheta/Theta)

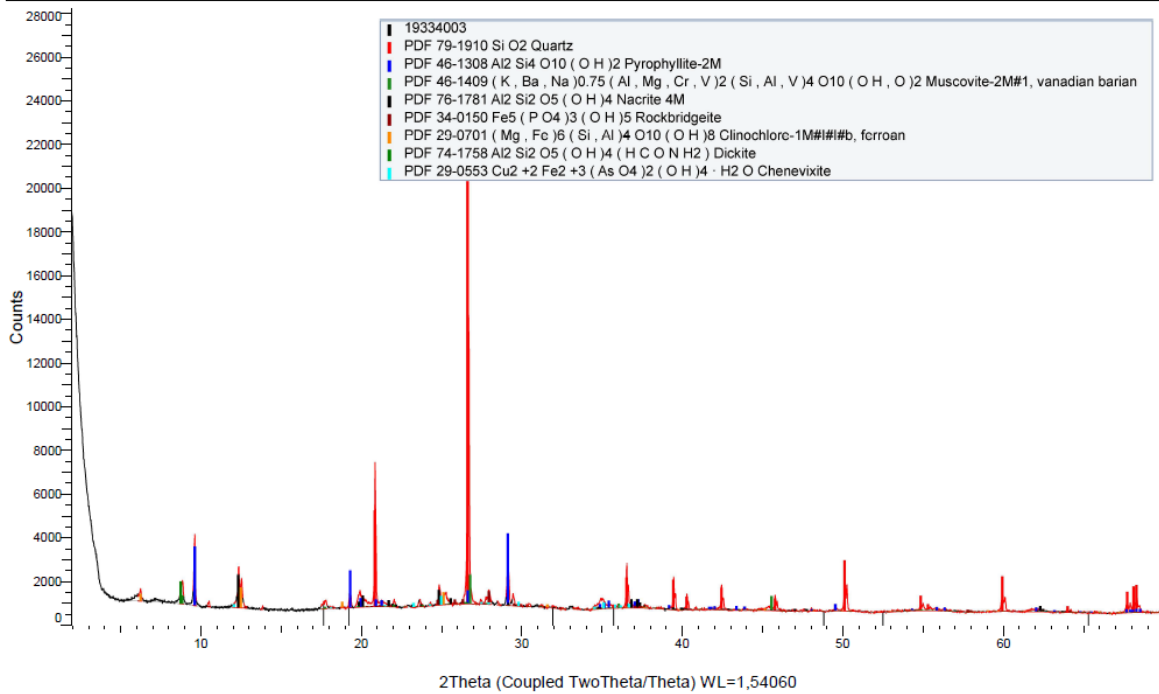


Figura A.4 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P7-C

(Coupled TwoTheta/Theta)

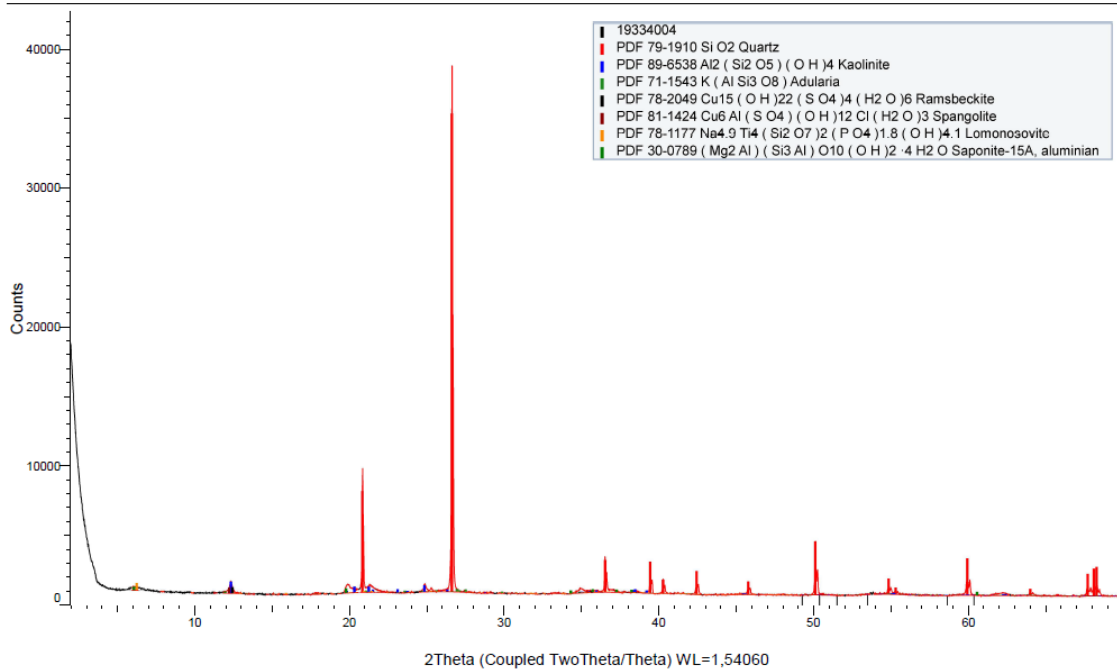


Figura A.5 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P6 molido

(Coupled TwoTheta/Theta)

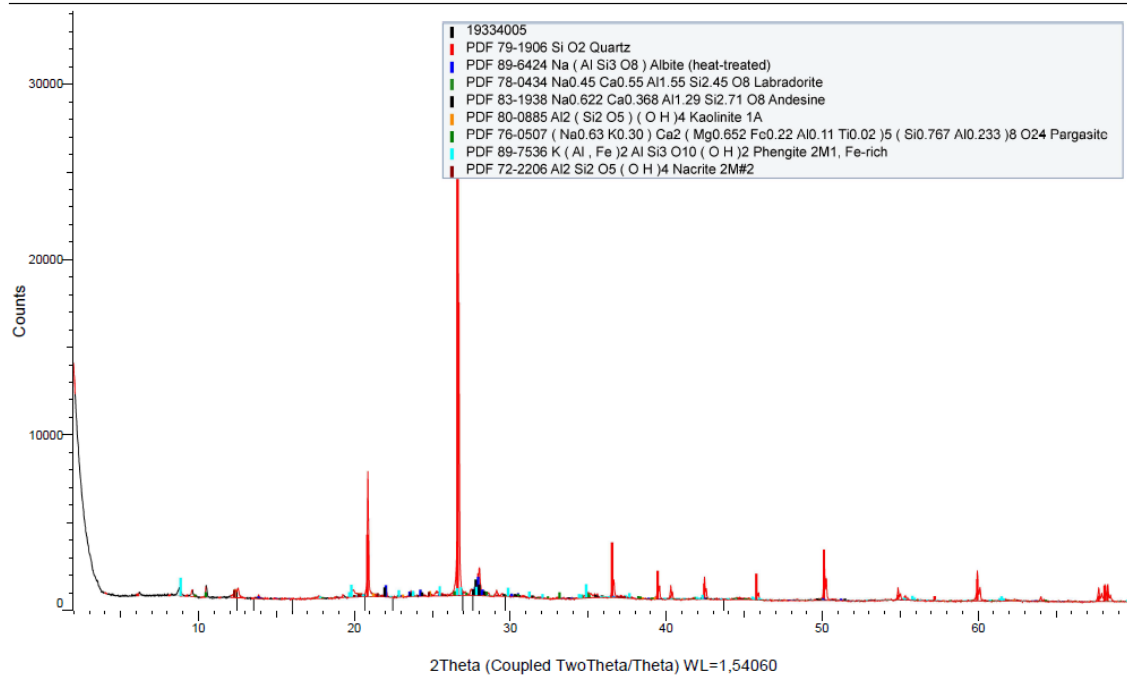


Figura A.6 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P7-C molido.

(Coupled TwoTheta/Theta)

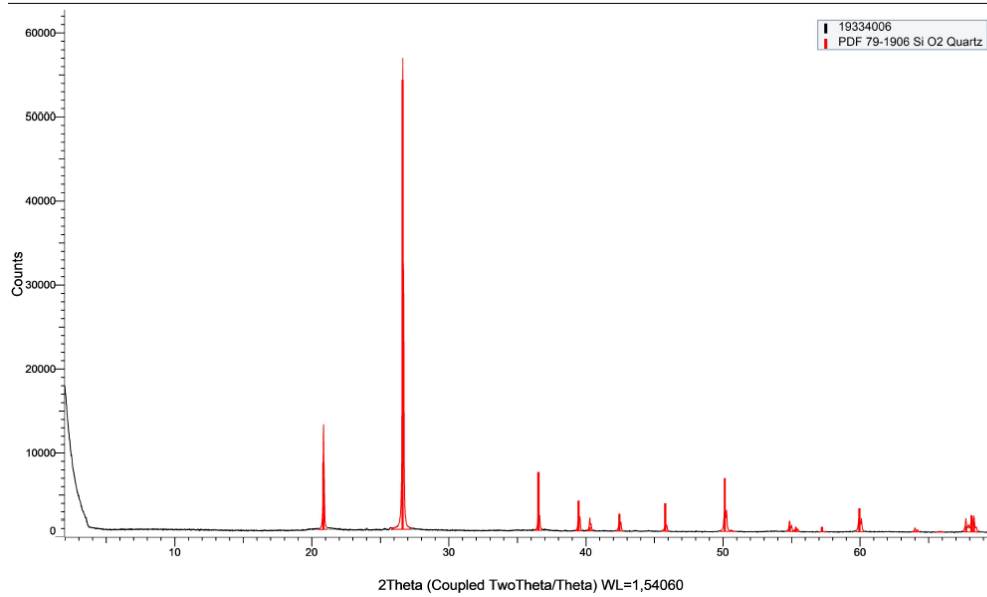


Figura A.7 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P2 orilla.

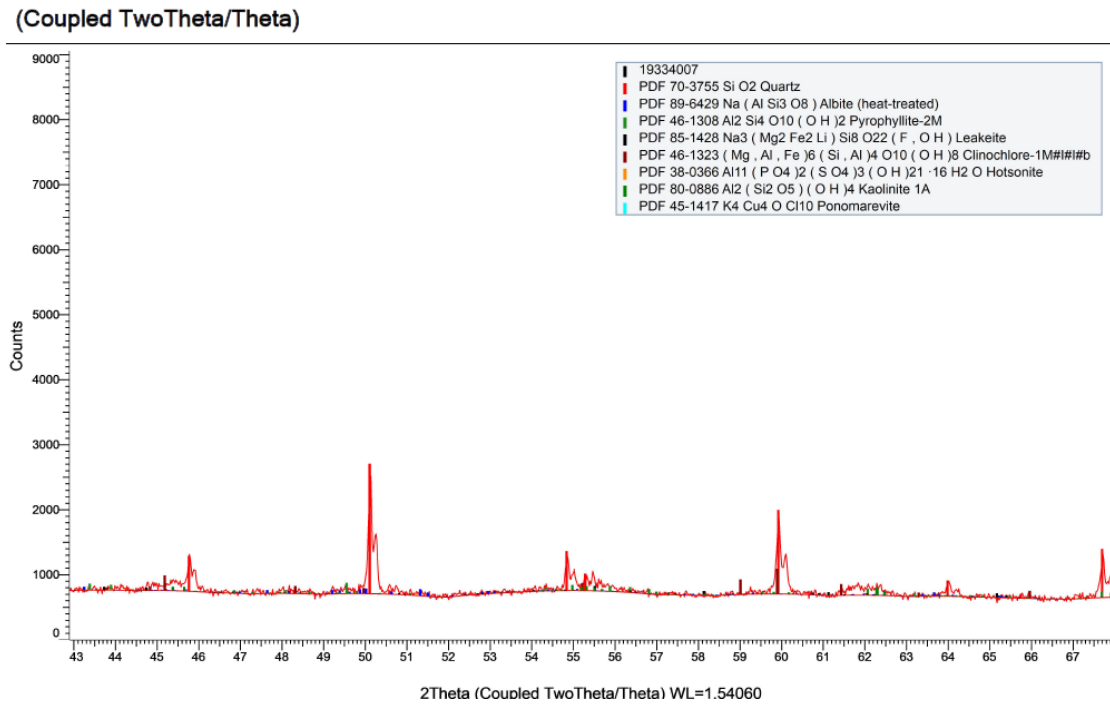


Figura A.8 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P2 orilla molido.

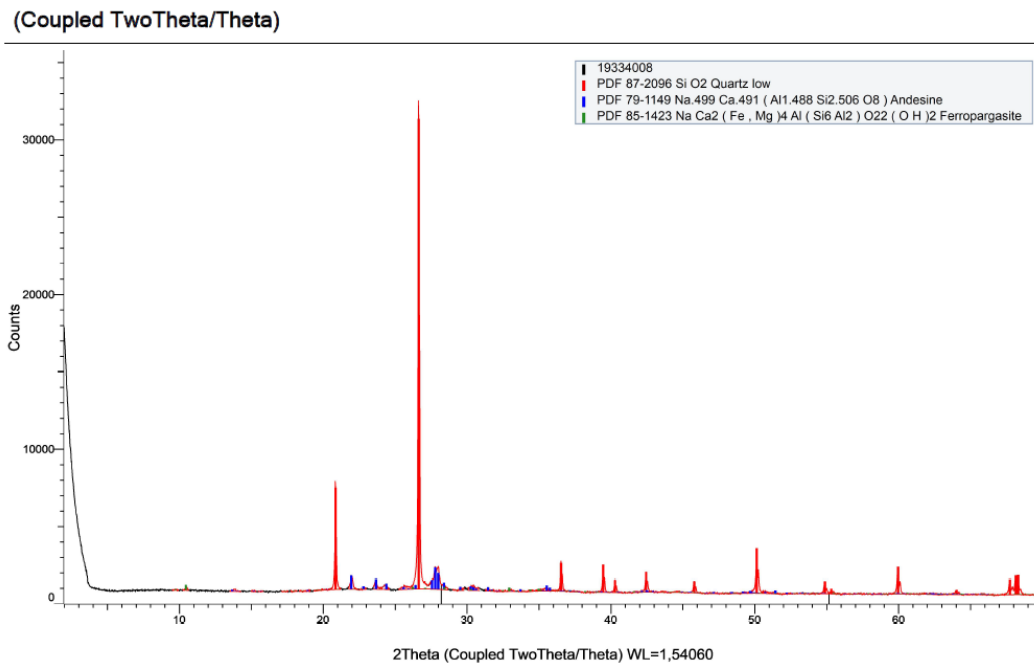
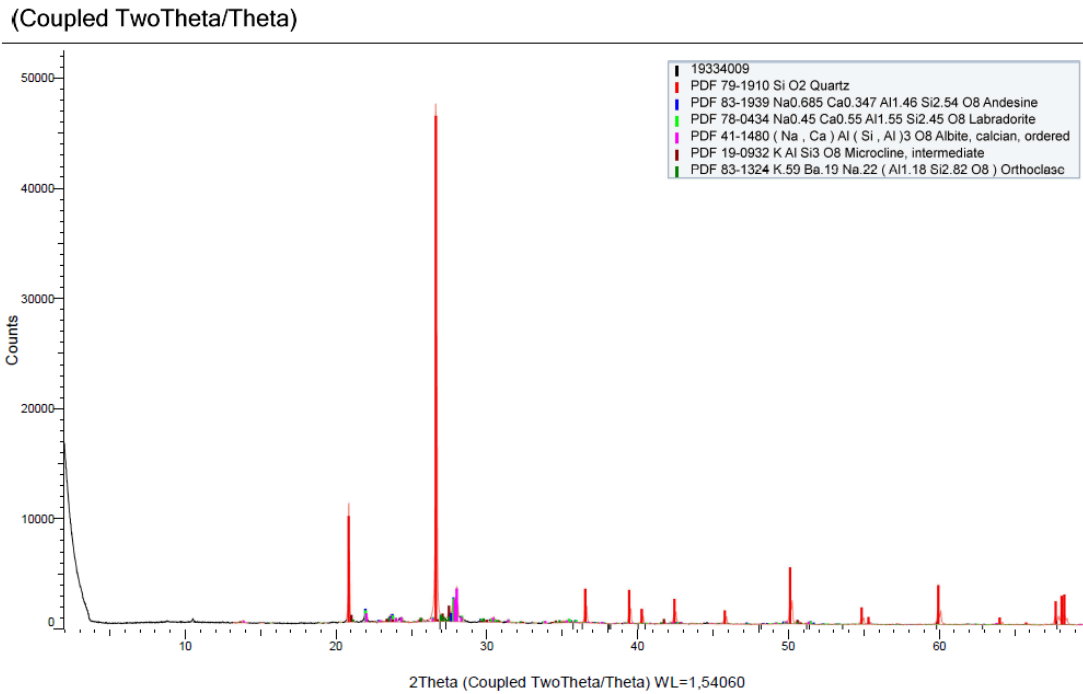
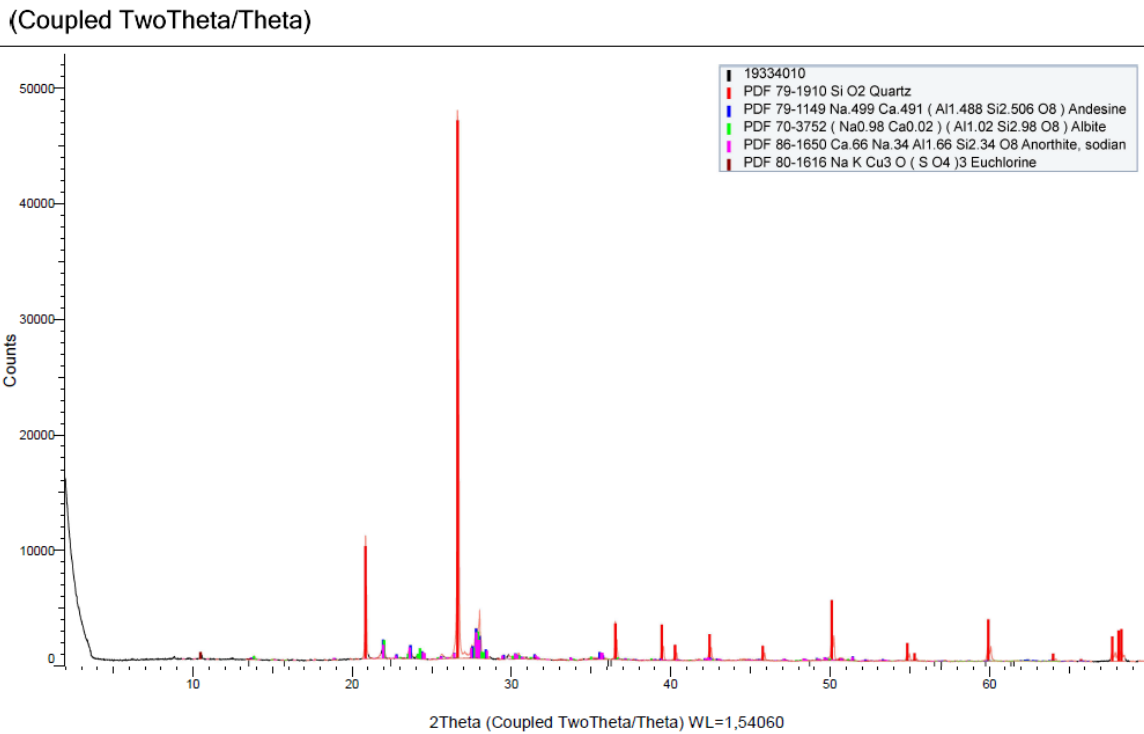


Figura A.9 Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P8 molido.



**Figura A.10** Gráfica de patrón de difracción de rayos X para el sedimento P9 molido.



**Apéndice B. Minerales Obtenidos En El Análisis Mineralógico Mediante Rayos X**

**Tabla B.1** Tabla de compuestos obtenidos en el análisis mineralógico para cada sedimento extraído

| Nombre                | P8 MOL | P9 MOL | P1 Mol | P2 Mol | P2 ORILLA MOL | P2 ORILLA | P6 Mol | P6 | P7 C | P7 C Mol | TOTAL |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|---------------|-----------|--------|----|------|----------|-------|
| Cuarzo                |        |        | 1      | 1      | 1             | 1         | 1      | 1  | 1    |          | 7     |
| Andesina              | 1      | 1      | 1      | 1      |               |           | 1      |    |      |          | 5     |
| Albita                |        |        | 1      | 1      |               | 1         | 1      |    |      |          | 4     |
| Quarzo low            | 1      | 1      |        |        |               |           |        |    |      | 1        | 3     |
| Muscovita 2M#1        |        |        | 1      |        |               | 1         | 1      |    |      |          | 3     |
| Kaolinita 1ª          |        |        |        |        |               | 1         |        | 1  | 1    |          | 3     |
| Pirofilita 2M         |        |        |        |        |               |           | 1      | 1  |      |          | 2     |
| Clinocloro            |        |        |        |        |               | 1         | 1      |    |      |          | 2     |
| Albita baja calciana  |        |        | 1      |        | 1             |           |        |    |      |          | 2     |
| Microclina intermedia |        |        | 1      |        |               |           |        |    |      |          | 1     |
| Pargasita potásica    |        |        | 1      |        |               |           |        |    |      |          | 1     |
| Ramsbeckita           |        |        | 1      |        |               |           |        |    |      |          | 1     |
| Ferropargasita        |        |        | 1      |        |               |           |        |    |      |          | 1     |
| Ortoclasa             |        |        |        | 1      |               |           |        |    |      |          | 1     |
| Fluor riebeckita      |        |        |        | 1      |               |           |        |    |      |          | 1     |



