



**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL  
TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO.**

**Perspectivas de mezclas de arcillas  
caoliníticas del yacimiento Dumañuecos y  
arena de El Rincón como material  
puzolánico. Provincia Las Tunas.**

Autor: Yaneisys Leyva Silva.

Tutores:

Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez

Ing. Ángel Eduardo Espinosa Borges

**MOA, 2022**

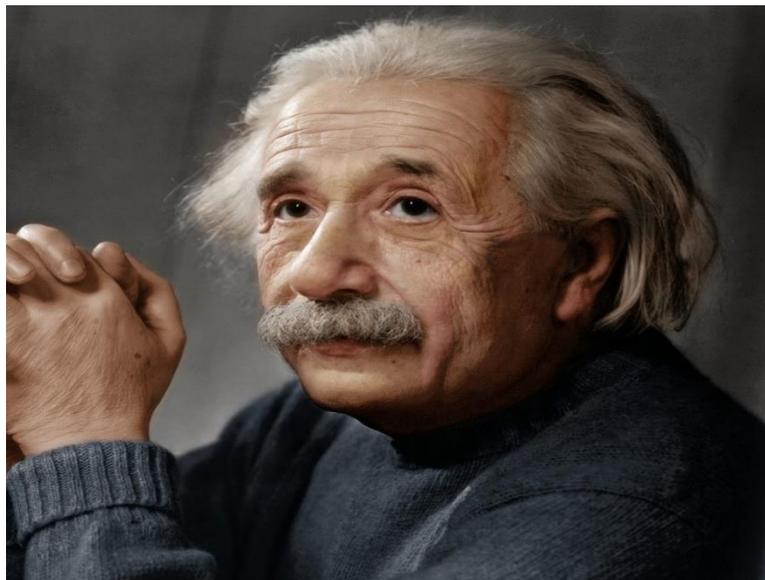
## *Pensamiento*

*“Es preciso suponer que en todo lo que se combina hay muchas cosas de todas las clases, y semillas de todas las cosas, que tienen formas diversas y colores y sabores distintos”.*

*Anaximandro*

*“En los momentos de crisis, solo la imaginación es más importante que el conocimiento”.*

*Albert Einstein.*



# *Agradecimiento*

A Dios por darme fuerzas y permitir que todo fuera posible.

A mi tutor Carlos Leyva por brindarme sus invaluable consejos y su inmensa experiencia, por preocuparse en todo momento.

A mi tutor Ángel Eduardo por brindarme sus conocimientos sobre el tema y ayudarme en todo el proceso siempre que lo necesité.

A todos los profesores de la Universidad de Moa que me impartieron clases a lo largo de la carrera, por compartir sus conocimientos y por toda su atención.

A toda mi familia por brindarme su apoyo y amor incondicional.

A mi pareja por su ayuda y compañía todos estos años.

A mis compañeros y amigos de aula por todos estos años que pasamos y compartimos juntos.

A los compañeros de la Empresa de Materiales de Construcción de Las Tunas, en especial al compañero Alberto por darle un gran impulso a mi investigación.

A los que de una forma u otra participaron y contribuyeron durante el proceso de la investigación y realización de este trabajo.

*A Todos Muchas Gracias.*

## *Dedicatoria*

A mi abuela, que aunque no se encuentra físicamente, supo guiarme y brindarme sus consejos, por haber sido como otra madre para mí, la cual respeto tanto y tiene un lugar muy especial en mi corazón.

A mi madre por siempre creer en mí y esforzarse tanto desde hace muchos años para que esto fuera posible, por dedicarme todos sus años de atención, experiencia, apoyo y amor; por ser ella la que me impulsa a seguir adelante con mis sueños y aspiraciones.

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar las mezclas de arcillas caoliníticas de las escombreras de Dumañuecos y arena de El Rincón como material cementicio suplementario. Las muestras de arcillas fueron caracterizadas química y mineralógicamente a través de las técnicas de difracción de Rayos X, Análisis Térmico Diferencial y Fluorescencia de Rayos X. Se calcularon los contenidos de caolín equivalente para ambas muestras de arcillas caoliníticas y arena; y se determinaron la pérdida por ignición, además de la resistencia a la compresión. Los resultados de análisis químico mostraron bajos valores de sodio, magnesio, calcio, manganeso, hierro, carbono y fósforo, y la alta concentración de sílice y alúmina en el yacimiento, se determinaron valores elevados de titanio, potasio y azufre. Se definió como paragénesis general la compuesta por cuarzo, caolinita, nacrita, illita, jarosita, montmorillonita y moscovita. En cuanto a la pérdida por ignición se obtuvo en la arcilla un promedio de 8.7 % y en arena un 1.03 %; un 62 % de caolín equivalente en arcilla y un 7.39 % en la arena en el intervalo de 350°C a 850°C. Luego de la suma ponderada de la mezcla según el método de François Avet los valores pronosticados de esta arcilla reportan resistencias menores que los requerimientos establecidos por la norma cubana para cemento P-35. El material resultante de la mezcla pronosticó resistencias por encima de 15 MPa a los 28 días por lo que pudiera ser empleado como mortero para la construcción.

## Abstract

The objective of this work is to evaluate the mixtures of kaolinitic clays from the dumps of Dumañuecos and sand from El Rincon as supplementary cementitious material. The clay samples were chemically and mineralogically characterized through X-ray diffraction, Differential Thermal Analysis and X-ray Fluorescence techniques. The equivalent kaolin contents were calculated for both kaolinitic clay and sand samples; and the loss on ignition, in addition to the compressive strength, were determined. The results of chemical analysis showed low values of sodium, magnesium, calcium, manganese, iron, carbon and phosphorus, and the high concentration of silica and alumina in the deposit, high values of titanium, potassium and sulphur were determined. The general paragenesis was defined as that composed of quartz, kaolinite, nacrite, illite, jarosite, montmorillonite and muscovite. Regarding loss on ignition, an average of 8.7 % was obtained in clay and 1.03 % in sand; 62 % of kaolin equivalent in clay and 7.39 % in the sand in the interval from 350°C to 850°C. After the weighted sum of the mixture according to the François Avet method, the predicted values of this clay report resistances lower than the requirements established by the Cuban standard for P-35 cement. The resulting material of the mixture predicted strengths above 15 MPa at 28 days, so it could be used as mortar for construction

# Índice

Introducción .....	9
Marco teórico conceptual.....	12
Arcillas .....	12
Materiales Cementicios Suplementarios .....	13
Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario .....	14
Capítulo I: Características geográficas y económicas de la región.....	18
Clima .....	19
Red hidrográfica.....	19
Vegetación.....	21
Desarrollo económico de la región.....	21
Suelos.....	22
Población.....	22
Uso y tendencia de la tierra .....	22
Servicios y redes técnicas.....	23
Yacimiento El Rincón.....	23
Capítulo II. Características geológicas de la región .....	24
2.1 Geología de la región.....	24
2.2 Geología del área .....	24
2.3 Estratigrafía.....	25
2.4 Vulcanismo regional.....	27
2.5 Tectónica .....	28
2.6 Geología del yacimiento.....	29
2.7 Características geológicas del Yacimiento El Rincón .....	30
Capítulo III. Metodología y volúmenes de la investigación .....	31
3.1 Introducción .....	31
3.2 Trabajos de campo .....	31
3.2.1 Características de la arena .....	32
3.2.2 Características de las arcillas.....	32

3.3 Preparación de las muestras y realización de los ensayos.....	33
3.3.1 Preparación de las muestras.....	33
3.3.2 Preparación para Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales .....	34
3.3.3 Muestras para Fluorescencia de Rayos X y Análisis de Carbono Azufre .....	36
3.3.4 Muestras para el análisis térmico y la pérdida de masa por deshidroxilación .	37
3.3.4.1 Secado.....	37
3.3.4.2 Molienda .....	37
3.3.4.3 Pesado.....	38
3.4 Métodos de análisis .....	38
3.4.1 Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales .....	38
3.4.2 Método térmico de determinación de pérdida de masa por deshidroxilación (PPI) .....	40
3.4.3. Formulación de la mezcla de arcilla y arena.....	41
3.4.4 Determinación de la resistencia a la compresión mecánica para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet .....	42
Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados.....	44
4.1 Análisis de los resultados de la caracterización química y mineralógica de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos .....	44
4.1.1 Resultados del análisis químico .....	44
4.1.2 Resultados del análisis mineralógico.....	45
4.2 Resultados de la determinación de las pérdidas de masa por deshidroxilación y los contenidos de caolín equivalente.....	47
4.3 Resultado del análisis de la resistencia a la compresión mecánica a partir del método de correlación de François Avet .....	50
Conclusiones .....	51
Bibliografía .....	52

## Introducción

La producción de cemento es considerada frecuentemente un indicador clave en el desarrollo de un país por varias razones. En primer lugar, es un producto esencial para la fabricación del hormigón, considerado como el material más usado en la industria de la construcción. La contribución del hormigón, y por tanto del cemento, a la construcción de edificaciones, carreteras, túneles, entre otros, hace que su producción sea reflejo de la actividad económica global. Entre los años 2000 y 2011, la producción de cemento se incrementó de 1660 a 3600 millones de toneladas a nivel mundial. Este incremento ha sido el soporte, en años recientes, del crecimiento y desarrollo de la infraestructura de varios países con economías emergentes.

Asociado a los procesos de manufactura del cemento, grandes cantidades de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) son liberadas a la atmósfera. Se calcula que entre 0.65 – 0.90 toneladas de  $\text{CO}_2$  son emitidas por cada tonelada de cemento fabricado, lo que hace responsable a esta industria de entre 5 – 8 % de las emisiones globales. Para el 2050 se espera que la demanda de este aglomerante supere las 5000 millones de toneladas, lo cual contribuiría a un incremento de más del 3 % de las emisiones de  $\text{CO}_2$  con respecto a los valores reportados en 2011. Por otra parte, la producción de cemento es catalogada como una industria energéticamente intensiva en la cual la energía representa entre el 20 – 40 % de los costos de producción totales y que según datos de 2010 consume el 85 % de la energía total empleada para la producción de minerales no metálicos, ello representa alrededor del 6 % de la energía total en el sector industrial.

Con el fin de atenuar el incremento de las emisiones de  $\text{CO}_2$  por la producción de cemento se han propuesto una serie de soluciones dentro de las que se encuentran las orientadas a aumentar la eficiencia del proceso, disminuyendo el consumo de combustibles, y el empleo de adiciones minerales con carácter puzolánico, o puzolanas, en la sustitución parcial del clínquer al CPO. Al mismo tiempo, la utilización de materiales cementicios suplementarios, favorece la disminución en el empleo de energías no renovables y contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante.

El uso de materiales cementicios suplementarios asociados a materiales de desecho, como los residuos agro-industriales, las cenizas volantes, escoria de horno, ceniza de cascarilla de arroz, relaves de cobre entre otros, gana cada vez más importancia en la producción de cemento y materiales de construcción. Su implementación ayuda a preservar las fuentes de agregados naturales y consecuentemente a reducir el impacto ambiental asociado con su explotación y reduce la cantidad de escombros.

Investigaciones recientes han demostrado que los materiales arcillosos con bajos contenidos en caolinita activada térmicamente pueden ser usados para sustituir hasta un 30 % de cemento Portland con excelente reactividad puzolánica a partir de los 7 días. Los estudios realizados muestran que, a pesar del costo de capital adicional requerido para la calcinación de la arcilla de caolinita, este producto reduce los costos de producción en un rango de 15 a 25 % en comparación con las soluciones convencionales.

En Cuba hay un gran número de yacimiento de arcillas caoliníticas diseminados por todo el territorio nacional, entre los que se destacan: Río del Callejón, Pino, Toño, Brooklyn y Santa Isabel en la zona occidental; Hortensia, Pontezuela, Gaspar y Bañadero en la zona Central y Dumañuecos, Caisimú, El Cobre, Cayo Guam y la manifestación Mir en la zona oriental.

Dumañuecos es un yacimiento de arcillas caoliníticas perteneciente a la provincia de Las Tunas, desarrollado por la acción hidrotermal sobre lavas de composición riolítica de la formación Caobilla. Este depósito fue explotado en tiempos pasados con fines cerámicos, por lo que se generaron elevados volúmenes de residuos arcillosos con altos contenidos en caolinita en escombreras, que en los últimos años ha cobrado un alto interés en su estudio como material cementicio suplementario. Se ha demostrado que arcillas con un contenido de 40 % de caolinita presentan buenas prestaciones para su empleo como material cementicio suplementario, por lo que se hace fundamental el estudio de estos residuos arcillosos y posibles mezclas con materiales menos reactivos para alargar la vida útil del depósito.

## **Problema**

¿Cómo emplear mezclas de arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos y arena del yacimiento El Rincón, en Las Tunas para hacer un uso más eficiente de este material y extender su vida útil?

## **Objeto de estudio**

Las mezclas de arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos y la arena del yacimiento El Rincón.

## **Campo de acción**

Las propiedades químicas y mineralógicas de las arcillas caoliníticas de las escombreras de Dumañuecos como material cementicio suplementario.

## **Objetivo general**

Estudiar las mezclas de arcillas caoliníticas de las escombreras de Dumañuecos y arena de El Rincón como material cementicio suplementario.

## **Objetivos específicos**

1. Caracterizar química y mineralógicamente las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos.
2. Valorar las pérdidas de masa por deshidroxilación y el contenido de caolín equivalente de las arcillas y la arena.
3. Pronosticar la resistencia a la compresión mecánica a partir del método de correlación de François Avet.

## **Hipótesis**

Si se caracterizan las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos, según la composición química, mineralógica, la pérdida de masa por deshidroxilación, y el contenido de caolín equivalente, y además se determina la pérdida de masa por deshidroxilación y el contenido de caolín equivalente de la arena del yacimiento El Rincón, se podrá proponer una mezcla para hacer un uso más racional de este material.

## **Marco teórico conceptual**

En el presente epígrafe se realiza un análisis conceptual sobre diferentes términos que fundamentan las prácticas de la presente investigación, profundizando esencialmente en las definiciones referentes a las arcillas y los materiales cementicios suplementario. Con el objetivo de describir las principales herramientas que apoyan el desarrollo de la investigación.

### **Arcillas**

La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedente de la descomposición de minerales de aluminio. Presentan diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato. Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2  $\mu\text{m}$ ). Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2  $\mu\text{m}$ .

En la arcilla existe una mezcla de determinados minerales típicos, los llamados minerales de arcilla, que en su totalidad son filosilicatos. Dentro de estos se destacan: illita, caolinita, halloysita, clorita, los llamados minerales arcillosos de capas mixtas interestratificadas y las esmécticas, montmorillonita sódica y cálcica: Beidelita, saponita, stevencita y hectorita, que son económica y técnicamente los minerales arcillosos más importantes. En la búsqueda y desarrollo de nuevas fuentes de materiales puzolánicos, existe creciente interés en el empleo de las arcillas activadas. Por su amplia disponibilidad, relativa facilidad de tratamiento y demostradas propiedades puzolánicas una vez que son estructuralmente modificadas, estas representan una atractiva alternativa como fuente de puzolanas (Alujas, 2010). Es su particular estructura en forma de láminas, los principales minerales y los compuestos acompañantes, así como su gran área específica, lo que define su comportamiento y reactividad (Alujas, 2010).

## **Materiales Cementicios Suplementarios**

Los materiales cementicios suplementarios se clasifican en aglomerantes hidráulicos y materiales puzolánicos. Los aglomerantes hidráulicos se caracterizan por reaccionar con agua formando productos de hidratación que aportan propiedades cementantes. Las puzolanas son materiales silíceos o aluminosos que por sí mismos poseen poca o ninguna actividad hidráulica, pero que finamente divididos y en presencia de agua pueden reaccionar con hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes (ASTM, 2008), y estas pueden clasificarse en dos grandes grupos como naturales y artificiales.

Dado el incremento de la producción mundial de cemento se ha hecho necesario implementar nuevas técnicas de elaboración del producto para disminuir su costo y la contaminación ambiental que durante su producción se genera. Para solucionar este problema se han tomado distintas estrategias dentro de las que se encuentran la modernización tecnológica, el uso de combustibles alternativos y el empleo de materiales cementicios suplementarios (MCS) en sustitución del clínker; siendo esta última la opción más viable para la industria cubana, pues requiere de menores inversiones a corto plazo.

Las puzolanas naturales más comunes son las cenizas volcánicas, tobas zeolíticas – que son las más abundantes en Cuba – y tierras de diatomeas (Betancourt Rodríguez, 1997) (Martirena, 2003) (Day, 1992). A pesar de presentar una gran variedad, las puzolanas naturales pasan por el problema de la disponibilidad. Otro MCS ampliamente usado por la industria del cemento es el carbonato de calcio en forma de piedra caliza sin calcinar. Aunque este no constituye una puzolana, se le adjudica cierta reactividad, que es muy baja en los cementos convencionales, por lo que se añade habitualmente en pequeñas proporciones como material inerte. (Damtoft 2008).

En el grupo de puzolanas artificiales se encuentran las pizarras, arcillas calcinadas, los residuos de productos cerámicos, así como las cenizas provenientes de procesos agrícolas como las de cáscara de arroz y las de bagazo de caña (Betancourt Rodríguez, 1997). También incluye los

subproductos o desechos de procesos industriales como son las cenizas volantes pulverizadas (PFA, por sus siglas en inglés), las escorias granuladas de alto horno (GBFS), y el humo de sílice (SF).

### **Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario**

Las arcillas en su estado natural no pueden ser usadas como puzolanas ya que presentan estructuras cristalinas estables que impiden la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica, por lo que deben ser sometidas a un proceso de activación que puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales la activación térmica es la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas.

Las arcillas que contienen un alto grado del mineral caolinita son empleadas con éxito en la obtención industrial de puzolanas de alta reactividad a partir de su calcinación, para obtener el producto conocido como Metacaolín (MK). La caolinita  $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ , se encuentra en el grupo de minerales arcillosos con la estructura más simple (solo dos láminas de filosilicatos). Contiene la mayor cantidad de grupos hidróxidos en su estructura y estos se encuentran ubicados en las capas externas, lo que facilita su pérdida (proceso de deshidroxidación) cuando es sometido a determinada temperatura, y por consiguiente, el desorden del aluminio, pues ambos están conectados directamente. Ello conlleva a un mayor desorden estructural con respecto al resto de las arcillas, que se traduce en una mayor reactividad. Adicionalmente, la caolinita, de entre los minerales arcillosos estudiados, requiere de la menor temperatura para la deshidroxidación de su estructura, la cual se considera ha sido completada a los  $600^{\circ}C$ , mientras que la mayor actividad puzolánica se obtiene entre  $700^{\circ}C$  –  $850^{\circ}C$ . Ello trae asociado un menor costo energético, además de conferirle a la caolinita una ventana térmica más amplia entre el comienzo del estado metaestable y la recristalización, lo que constituye una ventaja tecnológica.

En investigaciones llevadas a cabo por la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas y la Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza, se obtuvieron excelentes resultados al evaluar las propiedades puzolánicas de un suelo arcilloso con solo un 40 % de caolinita

después de ser activado térmicamente, que permite sustituciones de hasta un 30 %, sin comprometer las propiedades mecánicas y la durabilidad del cemento resultante. En proyectos posteriores, empleando las mismas arcillas de baja pureza, se produjeron cementos aumentando el por ciento de sustitución y se obtuvieron buenos resultados. Con esto se demostró que se puede elaborar un cemento ternario, con materias primas de nuestro país, compuesto por clínquer, arcilla calcinada y caliza, como fuente de carbonato de calcio.

### **Estado del arte**

En Cuba la industria cerámica ha tenido un amplio desarrollo a partir de 1959; sin embargo, este desarrollo y, sobre todo, las investigaciones, estudios y los resultados a los que se ha llegado, no han quedado en la memoria escrita en los archivos.

No obstante, varios autores han realizado numerosas investigaciones relacionados con la caracterización de los yacimientos arcillosos con el objetivo de valorar sus potencialidades como materia prima en la industria de cerámica roja. En este trabajo se hace referencia principalmente aquellos realizados en la Isla que han quedado vigentes hasta nuestros días.

- Las características fundamentales de las arenas de moldeo más utilizadas en la industria de la fundición (sílice, cromita, circonio, olivino), se describen en el trabajo realizado por Larrañaga y Armazabal, (2000); se realizan comparaciones entre sus principales propiedades (dureza, densidad, temperatura de fusión y dilatación lineal) y se analizan además las características de los materiales auxiliares para preparar las mezclas de moldeo.
- (Oliveros, 2002), caracteriza desde el punto de vista físico – mecánico las arenas sílice, olivino y cromita, y determina los parámetros y propiedades de las mezclas autofraguantes. Evalúa la factibilidad económica del uso de estas mezclas con la utilización de las arenas cubanas.
- (Cortés et al., 2004) En Cuba existe una gran variabilidad genética de depósitos y yacimientos de arcillas caoliníticas, entre los cuales se destacan los sedimentarios, de meteorización, e hidrotermales. Los

principales yacimientos de arcillas caoliníticas en la región centro oriental de Cuba están relacionados con la Formación Caobilla y tienen un origen hidrotermal.

- Según (Alujas, 2010) la fracción arcillosa multicomponente calcinada a 800°C durante 60 minutos, que representa el mejor compromiso entre el grado de desorden estructural y la superficie específica, mostró la mejor reactividad puzolánica tanto en pastas como en morteros, seguida de la fracción arcillosa calcinada a 600°C, con alta superficie específica e incompleta descomposición de las fases arcillosas, y de la fracción arcillosa calcinada a 925°C, con baja superficie específica, completa descomposición de las fases arcillosas, y que marca el inicio de los fenómenos de recristalización.
- (Brocard Rivera, 2011) realizó una evaluación con mezclas de arcilla y arena sílice residual para su utilización en la industria cerámica demostrando que la mezcla de 40 % de arcilla; 57 % de mezcla de arena sílice residual y 3 % de agua, fue la que mejores resultados alcanzó atendiendo a las propiedades evaluadas.
- Los MCS son adiciones silicoaluminosas que se presentan en forma amorfa o pobremente cristalina, que, molidas finamente, en presencia de humedad y a temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el CH liberado durante la hidratación de los silicatos, para formar compuestos con propiedades cementantes. Cuanto mayor sea el contenido de sílice amorfa y menor la proporción de impurezas cristalinas, más reactiva resultará la adición. Este tipo de adiciones reciben también el nombre de puzolanas o materiales puzolánicos (Olivier, 2012);
- Las arcillas en su estado natural no pueden ser usadas como puzolanas ya que presentan estructuras cristalinas estables que impiden la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica (Shi, 2001), por lo que deben ser sometidas a un proceso de activación que puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales la activación térmica es la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas (Delgado, 2015).

- (Harvey and Legaly, 2006; Murray, 2007; Pruett, 2015) Hace algunos años el uso a gran escala de metacaolín se vio limitado por la baja disponibilidad de yacimientos de alta pureza y la competencia con industrias ya establecidas durante muchos años como la cerámica y el papel.
- Según (Almenares Reyes, 2017) el contenido de minerales arcillosos del grupo de la caolinita es el factor de mayor influencia sobre la reactividad puzolánica de sus productos de calcinación. La temperatura de activación térmica y la presencia de minerales acompañantes térmicamente inestables durante el proceso de calcinación también muestran influencia sobre la reactividad puzolánica. La reactividad puzolánica de las arcillas caoliníticas activadas térmicamente es directamente proporcional al contenido de Al soluble en medio alcalino en sus productos de calcinación.
- (Espinosa Borges, 2019) en su tesis de “Evaluación de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos para la producción de cemento de bajo carbono” identificó que estas arcillas contienen bajos valores de sodio, magnesio, calcio, manganeso, hierro, carbono y fósforo, y la alta concentración de sílice y alúmina en el yacimiento y valores elevados de titanio, potasio y azufre, donde obtuvo que el análisis de reactividad puzolánica en las arcillas reveló que la temperatura óptima para la disolución en fases ricas en aluminio y silicio se obtuvo a los 800°C.

# Capítulo I. Características geográficas y económicas de la región

## 1.1 Ubicación geográfica

El yacimiento de caolín Dumañuecos está ubicado en el poblado de Dumañuecos del municipio de Manatí en la parte septentrional de la provincia Las Tunas, este limita al este con el municipio de Puerto Padre, al oeste con la provincia de Camagüey, al sur con el municipio Las Tunas y al norte con el Océano Atlántico.

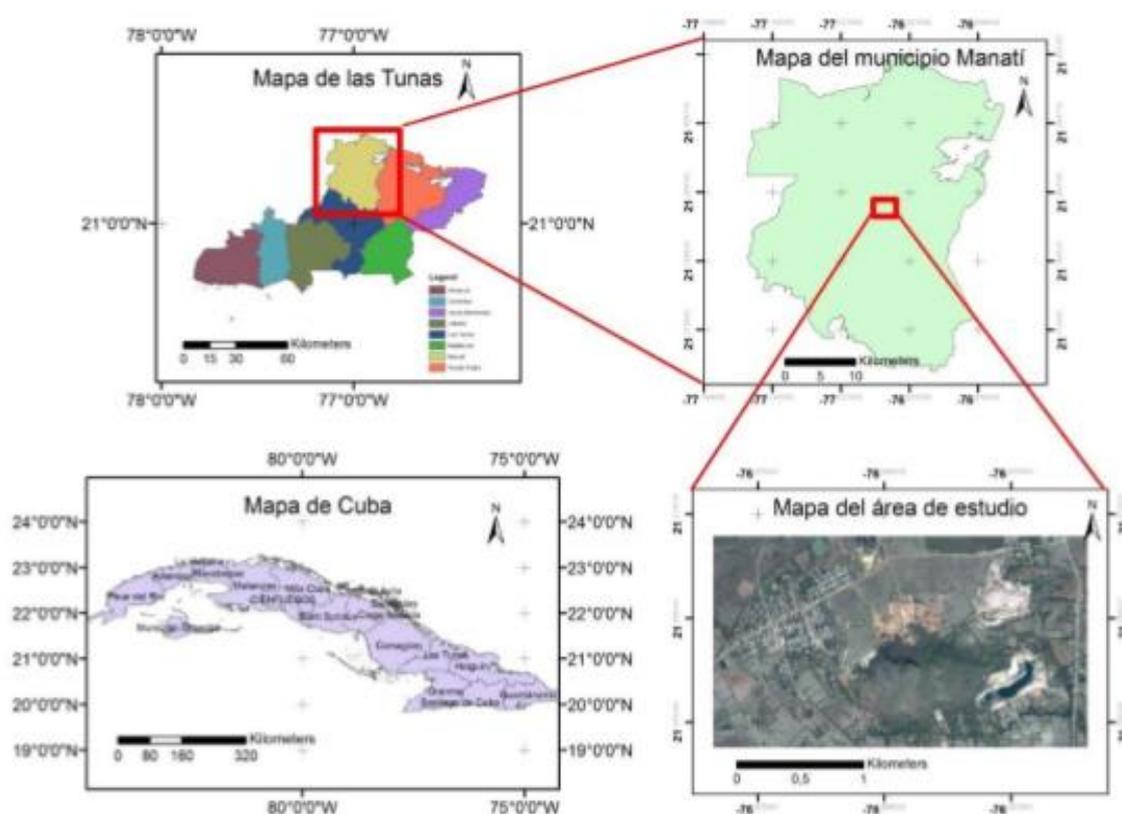


Figura 1: Esquema de ubicación geográfica (Espinosa Borges, 2019)

## 1.2 Relieve

En la región el relieve se presenta en forma de llanura abrasiva-automentativa ligeramente diseccionada con cotas que oscilan entre 10 y 40 m, ya en el área costera que bordea la bahía la llanura es laguno-palustre con cotas entre 5 y 10 m. En la parte periférica exterior de la zona la llanura es abrasiva denudativa, diseccionada con cotas entre 20 y 40 m. Al sur esta llanura está limitada por el peniplano Florida-Camagüey-Tunas (Valdés, 1987).



**Figura 2: Esquema de elevaciones del Municipio Manatí (Espinosa Borges, 2019)**

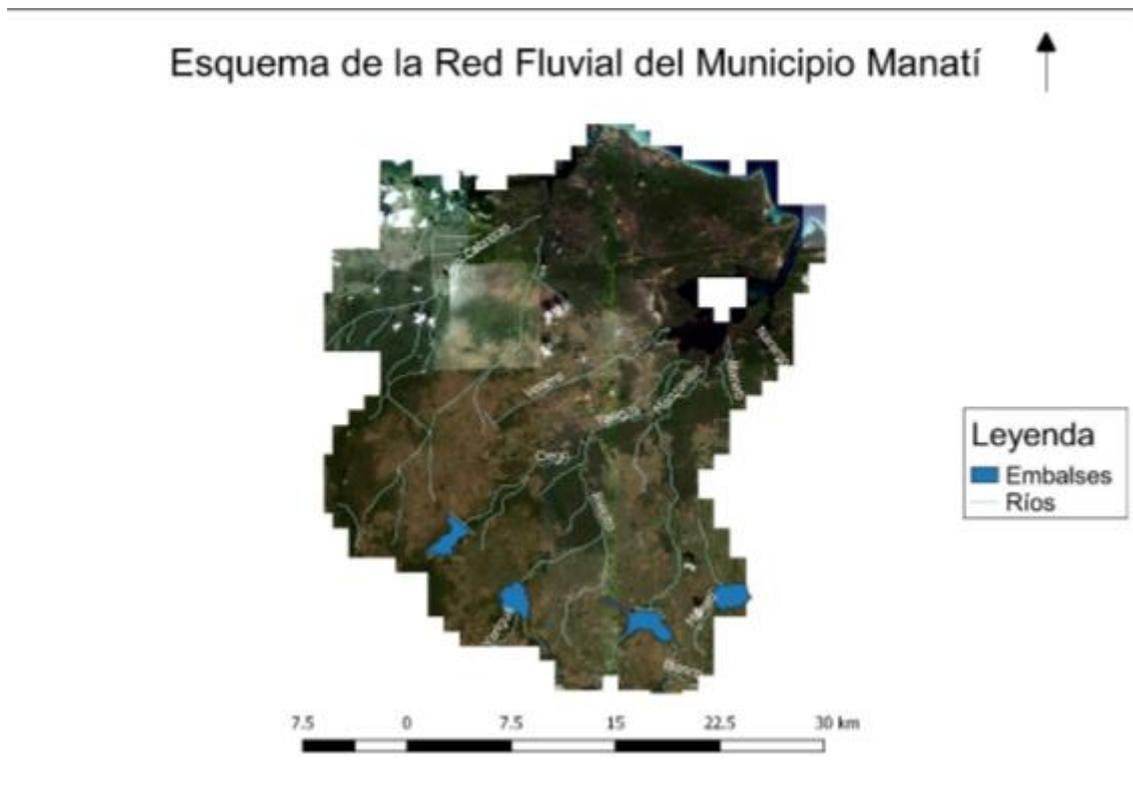
### **Clima**

El clima que predomina en Las Tunas es tropical de sabana. Las temperaturas máximas promedio registradas son 27,4°C y las mínimas promedio de 23,4°C, las que se ajustan a lo expresado en el nuevo Atlas Nacional de Cuba en cuanto al régimen anual de 24°C en las llanuras. El promedio anual de la evaporación potencial oscila entre 2 379 y más de 2 780 mm, el que se ubica entre los más altos del país. La humedad relativa alcanza valores mensuales que oscilan entre 74 % en marzo y abril y el 83 % de septiembre a noviembre. Predominan los vientos del tipo Palmarito del Cauto, con alisios y calmas y promedios de velocidades que oscilan entre 7,7 y 13,7 Km/h (Feria Ávila 2004, p. 17).

### **Red hidrográfica**

La red hidrográfica de la región es poco densa y su importancia es muy limitada, está compuesta por los ríos Yariguá, Gramal y Manatí que son de poco caudal y que desembocan en la bahía de Manatí; además del río

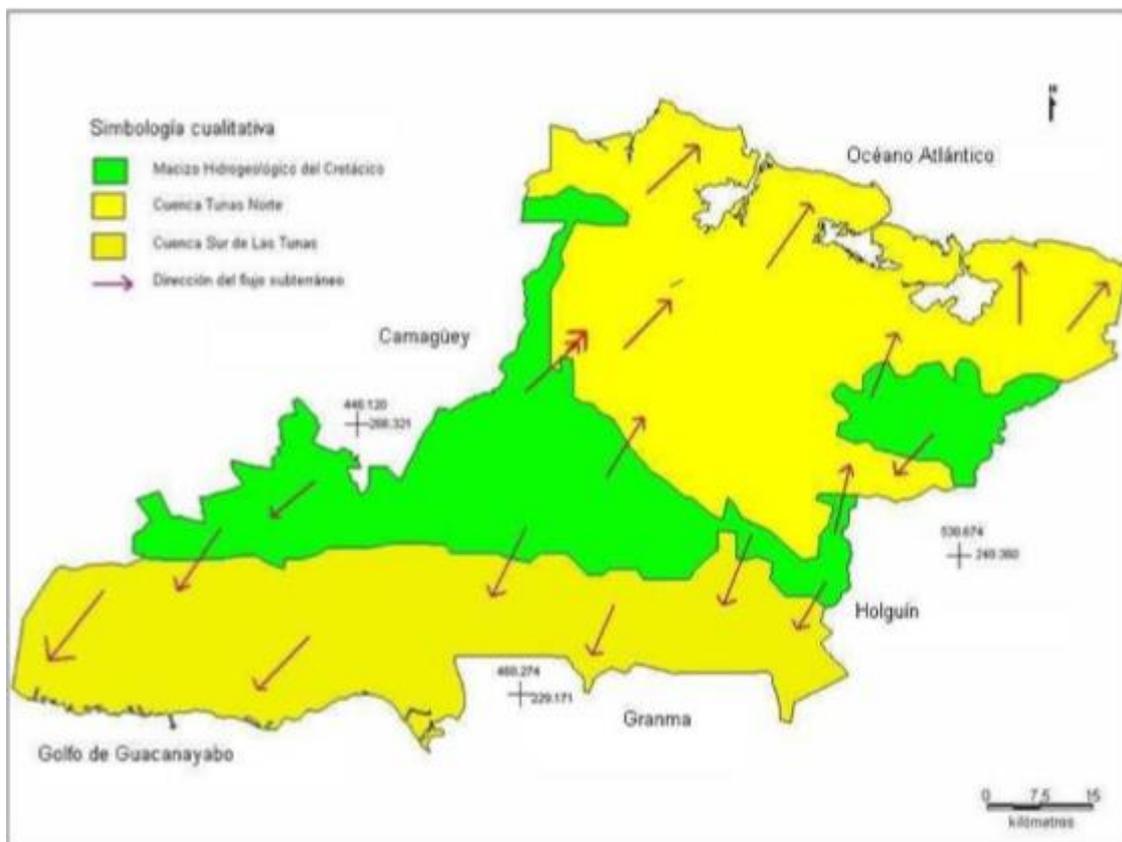
Cabrerías y los arroyos Venero y Brazo Gramal que corren entre el N y el N-NE (Valdés, 1987).



**Figura 3: Red hidrográfica de Manatí (Espinosa Borges, 2019)**

Las rocas son poco porosas y por lo general, las aguas subterráneas proceden de la infiltración de las precipitaciones atmosféricas que ocurren en la región. Como se muestra en la figura 5, el flujo se presenta en varias direcciones, debido a los desniveles del terreno y a las condiciones topográficas. Predomina el flujo desde el parte aguas central hacia la porción Sur y Norte.

La Cuenca subterránea Tunas Norte está formada por sedimentos del Cuaternario y rocas del Neógeno que yacen concordantemente sobre las de edad Cretácico. Los principales acuíferos se desarrollan en la formación Vázquez, que almacenan considerables volúmenes de agua subterránea (cuenca La Cana). La dirección del flujo es desde el Sur Sudoeste hacia el Norte (Zamora 2008, p. 42)



**Figura 4: Estructura hidrogeológica de Las Tunas (Vázquez Fernández. E, 2007)**

### **Vegetación**

La vegetación del Municipio de Manatí es típica de sabana, aunque de forma local aparecen parches de intensa y frondosa vegetación, con árboles de gran tamaño, conjugándose a veces con un intenso desarrollo de marabú que en general es relativamente abundante, pero de poca altura, en las áreas bajas que bordean la bahía predominan los manglares, bosques sublitorales y herbazales salinos costeros, más hacia el sur, a medida que aumenta la cota aparecen herbazales y matorrales subarborescentes de la costa arenosa y rocosa. En los valles de los ríos existen herbazales con aislados arbustos secundarios, mezclados con cultivos de caña de azúcar que predominan en toda el área, entre los principales exponentes de la vegetación mantienes se encuentran: la caoba de Honduras, majagua, cedro, ocuje, uva caleta, roble, etc.

### **Desarrollo económico de la región**

La principal actividad económica del municipio es la agricultura. Tanto en el municipio como en la provincia en general se incentiva la actividad a través de un

proyecto de inversión extranjera: el PIAL (Proyecto de Innovación Agrícola Local), a través del cual se proveen a los productores de materia prima para las actividades de cultivo, así como de los medios de trabajo. La ganadería constituye el segundo renglón de importancia para el municipio. Existen mini-industrias como los laboratorios farmacéuticos, empresas panificadoras; fábricas productoras de pienso; hidroeléctricas; combinado cárnico con matadero, planta de harina animal. Existen producciones de losetas, ladrillos de barro, producción de hormigón prefabricado, canastilla, pantalones, leche pasteurizada, mantequilla, yogur y helados, entre otros.

### **Suelos**

Los suelos que predominan son los arcillosos, algún ferrolítico rico en hierro y pequeñas franjas de suelos fersealítico en la zona rural del polo productivo Dumañuecos, que por sus características se cultiva mucho la papa, los colores de este suelo pueden ser rojos, carmelitas y negros. Manatí es relativamente plano, los suelos son arcillosos, permeables con un buen drenaje de textura moderadamente grueso, algunos presentan sales y sodio. Se agrupan en suelos de planicie aluvial, lacustre y colinas.

### **Población**

Manatí posee una población aproximada de 31 718 habitantes y una densidad poblacional de 3,3 habitantes/km<sup>2</sup>.

### **Uso y tendencia de la tierra**

La realidad de las áreas antropizadas del territorio se dedican a las actividades agropecuarias, el cultivo más extendido la caña de azúcar que abarca gran parte del territorio conformando macizos cañeros amplios, se cultiva en menor cantidad el plátano, la yuca, el boniato y la papa entre otros. La ganadería especialmente la vacuna, muestra un desarrollo acelerado, lo que obliga a dedicar algunas extensiones de terreno al cultivo de los pastos. Junto a los cultivos se desarrolla la llamada vegetación segetal constituida por vegetación espontánea. En los caminos se desarrolla la llamada vegetación ruderal que con la llegada de las lluvias se torna exuberante.

## **Servicios y redes técnicas**

El Municipio de Manatí es una zona de cultivos varios que consta de dos UBPC, dos CCSF, 3 Km de agricultura urbana, una unidad de servicio, seis tiendas, una panadería, una fábrica de conservas, un mercadito de la comunidad y un merendero. Existe además un centro de interés turístico, el Lago Azul. El municipio se enlaza desde Las Tunas hasta el Puerto de Manatí utilizando las vías férreas, por donde circula el tren de Las Tunas a Manatí y la carretera intermunicipal Manatí-Las Tunas que pasa por la Guinea y tiene ramales que llegan al cerro de Caisimú, la Victoria y Las Catalinas.

## **Yacimiento El Rincón**

**Ubicación geográfica:** se ubica geomorfológicamente en la Mega región Cuba - Central, en las llanuras y alturas centrales de Florida – Camagüey – Las Tunas, con relieve de llanuras abrasivas, abrasivo - denudativas, con alturas entre 80m y 90 m y pendientes del 1 %. En la zona el drenaje superficial es considerado eficiente según el mapa de factores limitantes del suelo.

**Los suelos** presentes en la zona se clasifican en los agrupamientos fersialíticos pardo rojizos. Por la profundidad efectiva se denominan suelos poco profundos (30 a 40 cm), sustentados sobre rocas ácidas (granitoides) y son medianamente productivos. A pesar de que sus pendientes son menores del 1 % se observan manifestaciones de erosión por el alto contenido de arena. Debido a su uso actual, (con fines mineros) no posee interés agrícola.

**Clima:** En esta zona predominan los vientos del ENE. Desde el punto de vista climático, posee un clima tropical de sabana, con veranos relativamente húmedos y temperaturas que oscilan entre 23°C y 27°C.

**La vegetación** es secundaria debido a la alta antropización del lugar, representada por herbáceas y algunos representantes arbustivos como el *Dichrostachys cinerea* (Marabú), Poaceae, Euphorbiaceae, Malváceas, Mimosoideae y Aumaranthaceae son las familias más representadas. La fauna del lugar es pobre, en cuanto a su diversidad, por ser un área muy antropizada, sólo existen poblaciones abundantes de grupos como insectos y reptiles.

## Capítulo II. Características geológicas de la región

### 2.1 Geología de la región

Según el informe del levantamiento geológico a escala 1:250 000 de la antigua Provincia de Oriente (realizado por la Academia de Ciencias de Cuba) el área perspectiva está enmarcada en la zona estructurofacial Auras y Tunas en menor grado, ambas por la cuenca superpuesta de la margen norte. El límite entre estas dos zonas está determinado por fracturas de carácter regional. En el área a investigar están presentes en general litologías de origen vulcanógeno-sedimentario, sedimentario o ígneo. En la región las rocas ígneas están representadas por intrusivos ácidos, granodioritas y dioritas de tipo abisales.

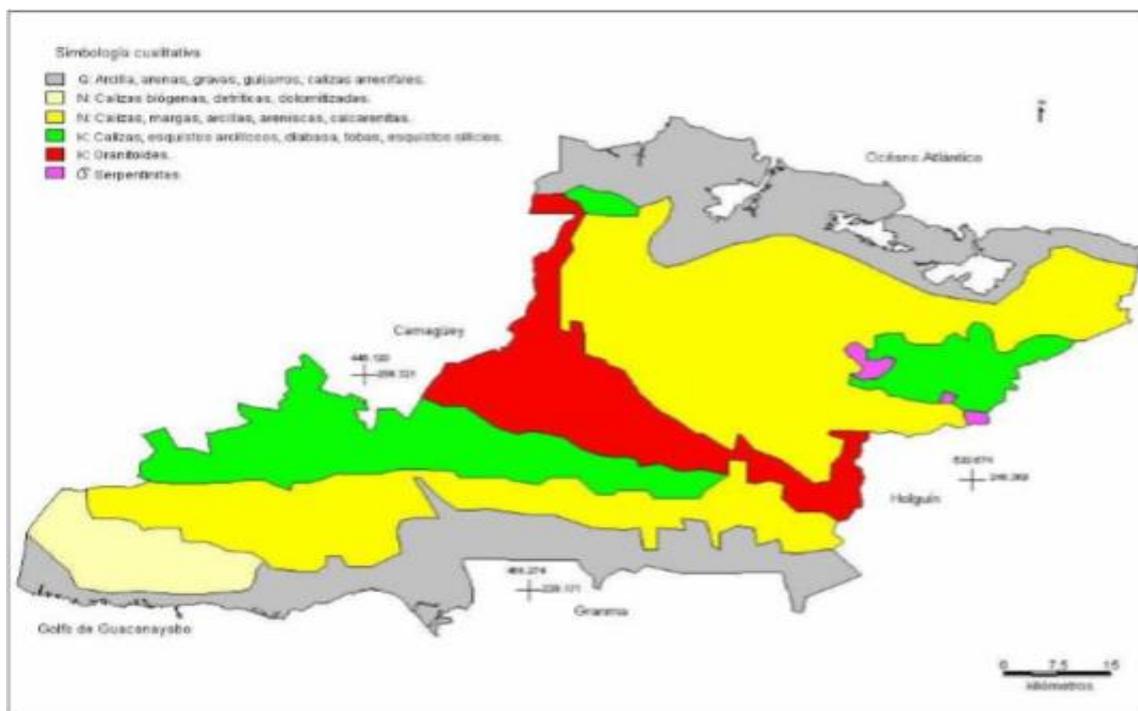


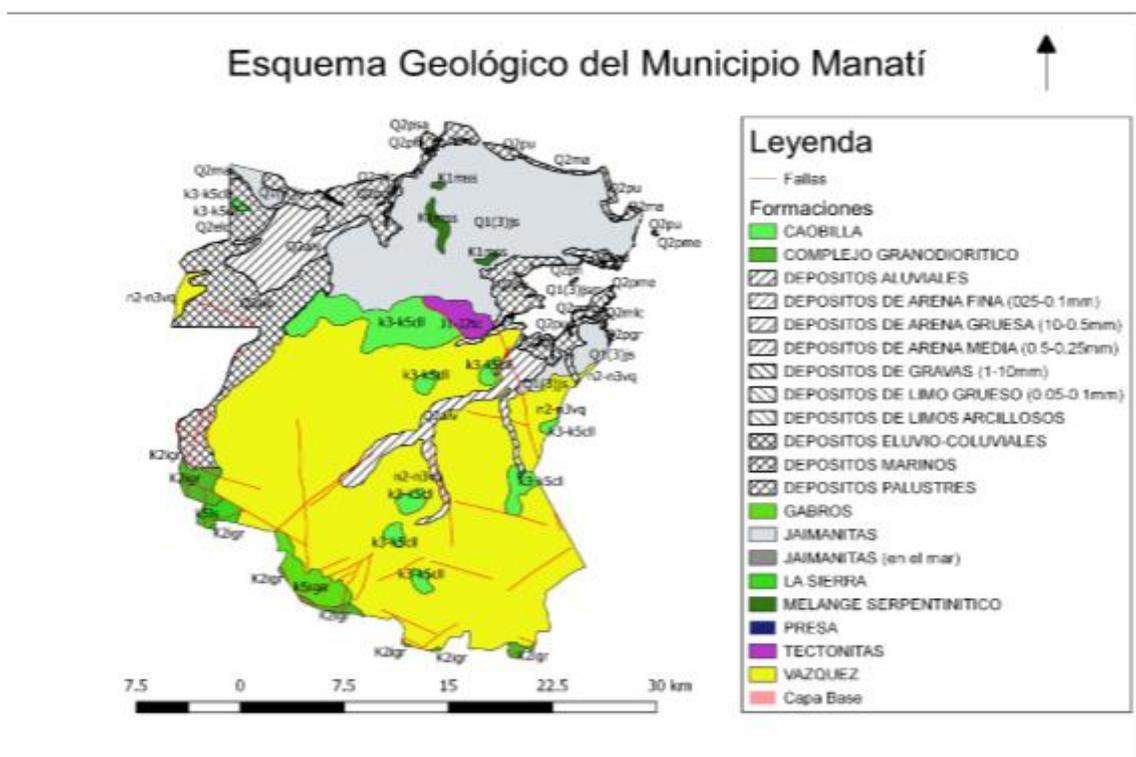
Figura 5: Mapa geológico de la provincia de Las Tunas (Vázquez Fernández. E, 2007)

### 2.2 Geología del área

La zona estudiada pertenece a las series inferiores y superiores del Cretácico, las cuales están representadas por el complejo de las rocas efusivas de composición intermedia y básica con la presencia de los cuerpos ultrabásicos en su parte septentrional y con la existencia de los cuerpos de granitoides del complejo Cretácico. En los alrededores del mismo se presentan los depósitos carbonatados del Neógeno respectivamente Mioceno.

El yacimiento Dumañuecos está relacionado con las rocas vulcanógenas las cuales presentan numerosas inclusiones y cuerpos intrusivos y cuerpos pequeños en las ultrabasitas, que se encuentran en el norte de Las Tunas. Los mismos se desarrollan en estrecha relación con las rocas de composición básica, las cuales se observan como cuerpos de muy variadas dimensiones y formas.

En los alrededores de las rocas intrusivas se observan las Formaciones Sedimentarias y Vulcanógeno-Sedimentarias. La más importante es la Formación Vázquez de edad Mioceno medio; se encuentra constituida por margas, calizas y arcillas verdosas y gris verdosas bentoníticas, cuyos depósitos se observan en los alrededores más próximos al cuerpo volcánico. Su edad está documentada por la presencia de abundantes fósiles, moldes de moluscos y microfauna (Hevia Delgado, 1983).



**Figura 6: Esquema geológico de Manatí modificado a partir del mapa geológico del IGP escala 1:100000 del año 2017**

### 2.3 Estratigrafía

La columna geocronológica de las rocas está representada por formaciones que van desde el cretácico inferior hasta el cuaternario.

Formación Caobilla: Secuencia vulcanógena donde predominan las variedades ácidas (dacitas, riodacitas y riolitas). Ocasionalmente entre las dacitas se encuentran traquidacitas. Las variedades medias incluyen andesitas de amplia difusión lateral y vertical, pero son poco significativas de acuerdo al volumen de la unidad. Tobs aglomeráticas de composición andesito- dacítica y calizas de grano medio. Yace discordantemente sobre las formaciones Vidot y Zurrupandilla y las ultramafitas. Es cubierta discordantemente por las formaciones Durán, Florida, Güines, Maraguán, Nuevitas, Paso Real, Presa Jimaguayú, Saramaguacán, Vázquez, Vertientes y el olistostroma Taguasco.

Formación Jaimanitas: Calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas, muy fosilíferas conteniendo principalmente conchas bien preservadas y corales de especies actuales. Las bolsas cársicas se encuentran rellenas por una fina mezcla carbonato- arcillosa ferruginosa de color rojo ladrillo. Pasan a calcarenitas masivas o finamente estratificadas y a veces contienen intercalaciones de margas. La cementación es variable. La coloración predominante es blancuzca o amarillenta. Yace discordantemente sobre las formaciones Cayo Piedras, Grande, Güines, Júcaro, Río Maya, Mícara, Vázquez, Vedado, calciruditas Feliz y el grupo Remedios. Es cubierta discordantemente por las formaciones Playa Santa Fe, por los depósitos del Holoceno y depósitos innominados del Cuaternario.

Formación La Sierra: Lavas y lavobrechas, fluidales, riolíticas, riodacíticas y dacíticas. Corta a las formaciones Camujiro y Piragua. Es cubierta discordantemente por las formaciones Durán y Presa Jimaguayú.

Formación Vázquez: Alternancia de margas, aleurolitas calcáreas o arcillosas, argilitas y arcillas esmécticas, arcillas arenáceas, que en la parte occidental del área de distribución contienen intercalaciones finas y concreciones de magnesita, la cual puede presentarse también en estratos de 5 m y más, subordinadamente calizas biodetríticas arcillosas, calizas micríticas, calcilutitas poco consolidadas (éstas a veces con débil fosfatización), calcarenitas, areniscas, pseudoconglomerados, conglomerados calcáreos y polimícticos, constituidos estos por serpentinitas, gabros, cuarzo, vulcanitas y granitoides. Algunos horizontes son muy ricos en microfósiles, principalmente moldes e impresiones de bivalvos siendo conspicuos en las arcillas los Ostreidae,

principalmente *Ostrea Rugifera*. Ellas contienen también yeso, pirita y lignito. Colores variados: crema, amarillento, grisáceo, verdoso, rojizo y blancuzco, predominando el primero. Estratificación enmarcada, en general, por los cambios litológicos. Yace discordantemente sobre las formaciones Caobilla, Iberia, Saramaguacán, el grupo Remedios, olistostroma Haticos y las ultramafitas. Es cubierta discordantemente por la formación Jaimanitas y la cobertura aluvial.

## **2.4 Vulcanismo regional**

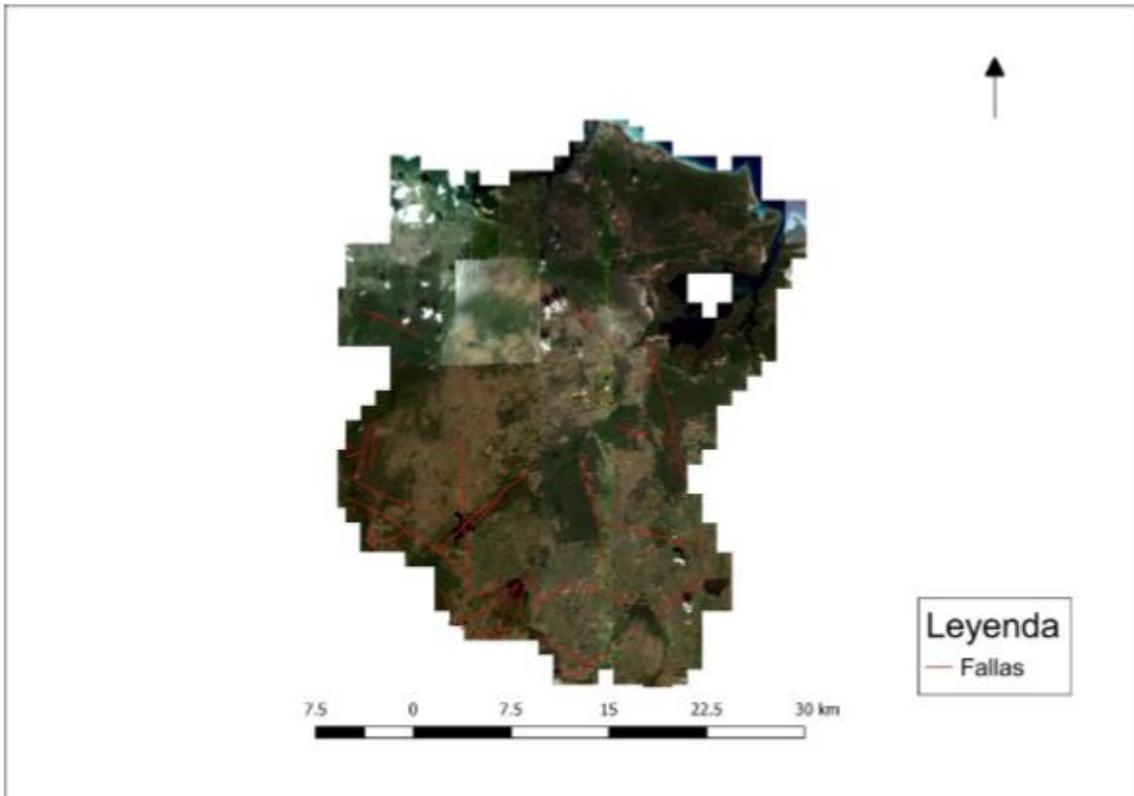
El desarrollo de la actividad volcánica en la región puede dividirse en dos etapas. La primera etapa se desarrolló en condiciones de mar profundo con generación de flysch vulcanógeno. La composición de las lavas varía de básica a media. Las rocas se caracterizan por presentar en el microscopio fenocristales de clinopiroxeno y plagioclasa básica y en cantidades subordinadas, olivino, ortopiroxenos y anfíboles. Como minerales accesorios se observan magnetita, apatito y en menor grado esfena. La segunda etapa se desarrolló en condiciones de mar somero y subaéreas, con formación de sedimentos molasicos. Los productos volcánicos presentan composición media a ácida, con un carácter alcalino más acentuado que en la etapa precedente. Las rocas medias se caracterizan por la presencia de fenocristales de plagioclasa media, clinopiroxeno y anfíboles. Además, en las variedades subalcalinas aparece feldespato potásico. Las rocas ácidas presentan fenocristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita. Los minerales accesorios que se observan en esta etapa son magnetita y apatito, en cantidades muy pequeñas (Talavera Coronel, F; Echevarría, B; Tchounev, D; lanev, S; Tzankov 1986, p. 24).



**Figura 7: Mapa esquemático de las Unidades Lito-Estratigráficas de Manatí modificado a partir del mapa geológico del IGP escala 1:100 000 del año 2017**

## 2.5 Tectónica

Según la división de las zonas estructuro faciales del área de Cuba Oriental el sector investigado se encuentra en los alrededores de la zona Tunas respectivamente próximo del contacto con la zona Auras que se extiende al noreste de la misma. El contacto entre dichas zonas se prevé tectónico con una falla o sistema de fallas profundas con una relación laterales-transgresionales y continúa desde Manatí hasta San Andrés. En la zona Tunas la dirección general de la estructura principal es NE-SW; con la misma coinciden el rumbo de la formación Buena Ventura y los pliegues lineales suaves presentes. Dicha zona pertenece a la megafacie precubana al Megasinclinar de las Antillas, mientras que la zona Auras pertenece al Melange (Hevia Delgado, 1983, p. 54).



**Figura 8:** Mapa esquemático de la tectónica de Manatí generado a partir de una imagen satelital del municipio y el mapa geológico del IGP escala 1:100 000 del año 2017

## 2.6 Geología del yacimiento

El yacimiento de caolín Dumañuecos (Hevia Delgado, 1983) se ha formado por transformaciones de riolita y parcialmente por las transformaciones de rocas tipo andesitas y tobas. La transformación de riolita en caolín fue causada por procesos post-magmáticos por las soluciones provenientes de las partes más profundas de la tierra. La meteorización ha originado arcillas coloreadas, pero no ha sido tan intensa como para eliminar de dichas arcillas su contenido de hierro. El origen del cuerpo de caolín no se puede aclarar por la influencia de factores climáticos, ya que sus partes más profundas se encuentran entre riolitas firmes cuarcificadas en profundidad a varias decenas de metros.

El caolín del yacimiento Dumañuecos es primario, porque se observa en muchos casos la estructura de la roca primaria, los fragmentos de cuarzo, restos de rocas más o menos caolinitizadas y otros minerales de forma angular o subangular, lo que documenta que el material no ha sufrido ningún tipo de transporte, es decir, se encuentra in situ. El mismo se formó por la

desintegración, descomposición y transformación de las rocas primarias feldespáticas como producto de la acción hidrotermal, en los alrededores de grietas y otros elementos tectónicos presentes, por las fumarolas y soluciones hidrotermales endógenas. No obstante, la participación de los factores climáticos no se puede eliminar, específicamente en el período posterior (Espinosa Borges, 2019).

En los yacimientos de caolín primario, hidrotermales, respectivamente epitermales es típico, que la forma de los cuerpos es generalmente muy irregular, cambiando bruscamente sus principales condiciones de yacencia, presentándose en forma de lentes o fajas de escasos metros hasta decenas de metros de anchura, su longitud por lo general no sobrepasa 300 - 600 m. Característico es también para estos yacimientos la gran variabilidad tecnológica de la materia prima y su inferior calidad dada por el mayor contenido de los minerales de hierro y titanio, así como su contenido variable de trióxido de aluminio. Con todos estos factores se corresponden los cuerpos de caolín conocidos hasta el momento en la zona de Dumañuecos (Hevia Delgado, 1983).

## **2.7 Características geológicas del Yacimiento El Rincón**

El área es parte del cuerpo intrusivo granodiorítico. En sus flancos norte y sur predominan secuencias vulcanógeno - sedimentaria frecuentemente metamorfizadas. Las dioritas, granodioritas, cuarcitas y dioritas cuarcíferas son las más abundantes en este tipo de intrusivo y datan del Cretácico Superior. Los minerales que se aprecian comúnmente son: feldespatos, cuarzos, hornblenda y micas.

La materia prima que se procesa está constituida por rocas granodioritas meteorizadas con una coloración gris a carmelita claro debido a un bajo contenido de mineral máfico. Las formaciones intrusivas que son las que nos interesan y dentro de estas las formadas por dioritas y granodioritas cuarcíferas constituyen el yacimiento, perteneciendo al complejo granodiorítico en su fase principal, describiéndose como medio granulares contenedoras de feldespato de potasio, tonalita, granodioritas y monzonitas cuarzosas.

## Capítulo III. Metodología y volúmenes de la investigación

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo se detallan gradualmente los materiales y métodos utilizados para la realización de la investigación, la cual estuvo dividida en tres etapas fundamentales. En la primera etapa se realiza una revisión bibliográfica de todos los materiales utilizados que guardan relación con la investigación. En la segunda etapa se documentó y seleccionó las muestras a analizar. En la tercera etapa se seleccionaron y prepararon las muestras para realizar los ensayos de laboratorio. En el laboratorio se realizó Análisis Térmico Diferencial, Difracción de Rayos X, Rayos X Diferenciales, Fluorescencia de Rayos X. Además, se calcularon los valores de las pérdidas por deshidroxilación y determinaron los contenidos de caolín equivalente. Además, se realizó una suma ponderada con la formulación de la mezcla de arcillas caoliníticas y arena, para determinar la resistencia a la compresión mecánica para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet.



*Figura 9: Etapas de la investigación*

### 3.2 Trabajos de campo

Los materiales a utilizar en la investigación son:

- Arcillas caoliníticas de las escombreras del Yacimiento Dumañuecos.
- Arena procedente del Yacimiento El Rincón

### 3.2.1 Características de la arena

La arena del yacimiento El Rincón está constituida por rocas granodioritas meteorizadas con una coloración gris a carmelita claro debido a un bajo contenido de mineral máfico, donde los minerales que se aprecian comúnmente son: feldespatos, cuarzos y micas.

La arena que se escogió para la investigación es procedente de este yacimiento, la cual es una arena lavada, que se utiliza en la empresa de Materiales de la Construcción de Las Tunas, la cual cumple los requisitos según los parámetros establecidos de arena natural lavada.

### 3.2.2 Características de las arcillas



*Figura 10: Fotografía de la escombrera ubicada en el yacimiento Dumañuecos*

Dumañuecos en décadas pasadas fue una cantera de caolín de alta pureza; en la actualidad los cortes in situ de arcillas caoliníticas son muy poco desarrollados en superficie. En el área se encuentran abundantes escombreras de destape. La roca madre presenta una intensa oxidación. Las rocas poseen un marcado olor a azufre. Se encuentran pequeñas drusas con cristales de alto peso específico que parecen estar compuestas por sulfatos (celestina o barita).

Las escombreras están compuestas por arcillas caoliníticas que no se explotaron para cerámica fina, pero de una gran pureza en general. Se identificó un material de escombrera con una coloración gris parda, que tiene abundantes fragmentos de roca de coloración rojiza, con dimensiones entre 1 a 5 cm de diámetro y fragmentos de roca de coloración blanca con dimensiones entre 1 a 7 cm de diámetro. Este material se comporta plástico al entrar en

contacto con agua y es muy deleznable. Son cortes de hasta 10 m de altura que demuestran un acarcamamiento acentuado originado por la exposición a los agentes climáticos.

La antigua mina de arcillas caoliníticas está inundada por casi 30 metros de agua, la cual posee una coloración azul verdosa.



*Figura 11: Fotografía del yacimiento actual Dumañuecos*

### **3.3 Preparación de las muestras y realización de los ensayos**

#### **3.3.1 Preparación de las muestras**

Las muestras fueron preparadas en el laboratorio físico del Instituto de Tecnología de Karlsruhe. Una vez desempacados fueron depositados en bandejas plásticas y secados a temperatura ambiente.



*Figura 12: Fotografía de paquetes de muestras tomadas en el laboratorio*

### 3.3.2 Preparación para Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales

Las muestras para Difracción de Rayos X se dividieron en dos grupos, las primeras fueron secadas a 40°C durante doce horas, luego fueron molidas en un molino de anillos en húmedo, usando 15 ml de isopropanol y la segunda serie fue tratada a 105°C, para lograr un mejor secado de las muestras sin llegar a comprometer la composición mineralógica.



**Figura 13:** Fotografía que presenta el Cuarteo en bandejas de las muestras para difracción de Rayos X



**Figura 14:** Fotografía del Molino de anillos

Las muestras tratadas a 105°C, fueron molidas a mano en un mortero de ágata durante 15 minutos aproximadamente. Se usaron 15 ml de isopropanol para la molienda en húmedo, agregando 5 ml cada 5 minutos. El resultado fue una pasta que luego se secó a 40°C por 12 horas.



**Figura 15: Fotografía de Mufla con ventilación interna y mortero de ágata**

Al tratarse de arcillas se decidió hacer preparaciones texturales especiales para análisis de la fracción arcillosa (DRXD). En este caso las muestras ya molidas y previamente secadas fueron colocadas en tubo de ensayo (4-5 g) donde se les agregó una mezcla de agua con amoníaco al 10 %. Luego fueron introducidas en una máquina de ultrasonido por 15 minutos. Pasado ese tiempo, se dejaron en reposo durante una hora para luego volver a ser sometidas a 15 minutos de ultrasonido. Luego de este procedimiento, la fracción limo arcillosa, permanece en suspensión y la fracción no arcillosa va al fondo. La reacción con el azufre provocó que la fracción limo arcillosa fuera al fondo muy rápidamente, así que las muestras fueron pipeteadas a los dos minutos y no se les dejó una hora de reposo.



**Figura 16: Fotografía de Máquina de ultrasonido y muestras en disolución con rápido asentamiento de la fracción no arcillosa.**



**Figura 17: Fotografía de diferentes series texturales**

Se prepararon tres series para análisis textural (Figura 23), la primera se colocó en placas de vidrio y se le permitió reposar durante 12 horas sin tratamiento alguno. Se nombró a esta serie T. La segunda fue tratada a 60°C en atmósfera de glicol por 24 horas (serie Q) y la tercera fue sometida a una temperatura de 550 °C durante 24 horas (serie B). El análisis de la combinación de estas tres series de tratamientos permite la identificación y cuantificación de los minerales arcillosos presentes en las diferentes muestras.

### **3.3.3 Muestras para Fluorescencia de Rayos X y Análisis de Carbono Azufre**

Las muestras para FRX se secaron a 40°C, luego se pulverizaron en el molino de anillos. Se tomaron 2 g de muestra previamente homogenizada y cuarteada, y se calcinaron durante 2 horas a una temperatura de 950°C. La ceniza resultante, fue colocada para su enfriamiento en una desecadora de vidrio. El método usado fue el de la perla fundida.

Las muestras para Carbono-Azufre fueron secadas a 40°C y posteriormente molidas en el molino de anillos. Hay que destacar que en cada de una de las preparaciones, se garantizó el adecuado cuarteo y homogenización de las muestras para garantizar en el marco permitido la representatividad de los análisis.

### **3.3.4 Muestras para el análisis térmico y la pérdida de masa por deshidroxilación**

Para el análisis de pérdida de masa por deshidroxilación y la determinación del contenido de caolín equivalente las muestras fueron sometidas a un proceso de secado y molienda para que tuvieran las características necesarias para estas pruebas y por último se pesaron para cuantificar el volumen de material con el que se estaba trabajando.

#### **3.3.4.1 Secado**

Para el secado se seleccionaron las muestras y se colocaron cantidades representativas en crisoles de cerámica refractaria. El secado se efectuó con un horno, fijando la temperatura de secado de las muestras a 200°C. Luego se sacaron los crisoles del horno con la ayuda de pinzas especiales y se colocaron en la desecadora para que no se hidrataran con el agua atmosférica. La desecadora está compuesta por una estructura de vidrio que contiene en la parte inferior una pequeña cantidad de sílice para que absorba el agua atmosférica que pueda quedar atrapada, en el medio se encuentra una base de cerámica refractaria con orificios de diferentes tamaños para colocar los crisoles con las muestras y en la parte inferior se encuentra una tapa de vidrio en forma de campana que evita el contacto de las muestras con la atmosfera, impidiendo que estas ganen agua (Figura 27: **Fotografía de Mufla eléctrica** Figura 28: **Fotografía de Balanza analítica**)

#### **3.3.4.2 Molienda**

La molienda se realizó de forma manual con la ayuda de un mortero de cerámica, aplicando fuerza y movimientos circulares para triturar la muestra al tamaño deseado. En este proceso se utilizaron pequeñas cantidades de muestra previamente seleccionadas, para lograr un resultado con mayor calidad y homogeneidad. Se empleó la identificación manual con un tamiz para lograr la granulometría deseada llegando al nivel de un talco con un nivel de finura por debajo de los 0.088 mm (Figura 29: **Fotografía del Mortero de cerámica con arcilla y arena.**)

### 3.3.4.3 Pesado

Para el pesado se empleó una balanza analítica SARTORIUS; inicialmente se pesaron los crisoles de cerámica refractaria que se utilizaron en el proceso de secado y calcinación de las muestras para poder, con una resta simple del peso del crisol contra el peso total de la muestra determinar el contenido neto de muestra contenido en cada crisol. Además, se repitió este proceso de pesado y resta para cada temperatura de calcinación (200,350, 750, 800, 850) y de esa manera se obtuvo los valores netos de muestra contenido en cada crisol que fue calcinada *Figura 27: Fotografía de Mufla eléctrica* *Figura 28: Fotografía de Balanza analítica*).

## 3.4 Métodos de análisis

### 3.4.1 Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales

Las diferentes series para análisis de la fracción arcillosa, así como las series originales en un equipo Bruker con las siguientes condiciones: radiación CuK $\alpha$  y una rejilla de divergencia de 0,5°. Las muestras fueron analizadas entre los 0 y los 80° (2 $\theta$ ), a un paso angular de 0,008° y un tiempo por paso de 30 segundos (Figura 30: Fotografía de muestras para la Difracción de Rayos X).

Se utilizó el software HighScore Plus, con base de datos de 2015 y PD2 complementaria, utilizando primero, subrutinas programadas y luego información obtenida del Manual de Difracción de Rayos X del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Para la correcta identificación de las fases arcillosas se utilizaron los siguientes criterios. Las cloritas tienen sus picos (001) en 14 a 14,4 angstroms, dependiendo de la especie individual. Las posiciones de los picos no se modifican por la saturación de iones, la solvatación con etilenglicol o el calentamiento. Sin embargo, los tratamientos térmicos por encima de 500°C alteran las intensidades máximas. Normalmente, el pico de clorita (001) puede aumentar dramáticamente y los picos de orden superior pueden debilitarse notablemente. En muestras poliminerales, las cloritas se pueden distinguir de la caolinita comparando los picos de 3,58 angstrom de caolinita y 3,54 de angstrom clorita, de las esmectitas por la expansión y contracción del pico de

esmectita (001) después de la solvatación con etilenglicol y el calentamiento a 40°C, y de la vermiculita por el colapso progresivo del pico de vermiculita (001) a los 550°C.

Los miembros del grupo illita por su parte se caracterizan por un intenso pico a los 10 angstrom (001) y un pico de 3,3 angstrom (003), que permanecen inalterados por la solvatación con etilenglicol o glicerol, saturación de potasio y calentamiento a 550°C.

Para el caso de las caolinitas, en muestras mono-minerales, los miembros dioctaédricos de este grupo se identifican fácilmente porque se vuelven amorfos a los Rayos X después de calentar a 550 grados y sus patrones de difracción desaparecen. La caolinita, la dickita, la nacrita y la halloysita pueden diferenciarse de la clorita mediante comparaciones del pico de caolín de 3,58 angstrom, con el pico de clorita de 3,54 angstrom y de la clorita y los miembros trioctaédricos de este grupo, mediante intercalación con acetato de potasio. El calentamiento por sí solo no distinguirá los minerales del grupo de caolinita dioctaédrica, de la clorita porque los picos de clorita (002), (003) y 004 también se debilitan por este tratamiento térmico.

Por su parte las esmectitas producen patrones de Difracción de Rayos X caracterizados por reflexiones basales que varían con la humedad, la exposición a ciertas moléculas orgánicas, el tratamiento térmico y los cationes intercambiables. Cuando se satura con etilenglicol, el reflejo (001) de la mayoría de las esmectitas se hinchará hasta aproximadamente 17 angstroms (aproximadamente 17,8 angstroms con glicerol); cuando se calienta a 400°C, la reflexión (001) colapsará a aproximadamente 10 angstroms (la cantidad exacta de colapso a menudo se relaciona con los cationes de intercambio presentes y con la esmectita en sí. Las esmectitas individuales a veces se pueden diferenciar por sus picos de orden superior o por saturación de cationes. Por ejemplo, las esmectitas dioctaédricas tienen (060) reflexiones en 1,50-1,52 angstroms, mientras que las esmectitas trioctaédricas tienen (060) reflexiones en 1,53-1,54 angstroms.

En el caso de la identificación de vermiculita, esta puede ser problemática debido a que sus características varían, la mayoría de las vermiculitas

saturadas e hidratadas con Mg producen un pico de 14 angstrom (001) que no se expande en la solvatación con etilenglicol. El pico (001) de vermiculita dioctaédrica se colapsa a aproximadamente 12 angstrom después de calentar a 400°C y a aproximadamente 11 angstroms después de calentar a 550°C.

Los minerales de arcilla de capa mixta son materiales en los que diferentes tipos de capas de arcilla se alternan entre sí. La mezcla o interestratificación en apilamiento vertical puede ser regular (ordenada), segregada regular o aleatoria. Las arcillas de capa mixta comúnmente descritas incluyen: illita-vermiculita, illitaesmectita, clorita-vermiculita (corrensita), clorita-esmectita, y caolinita-esmectita. Las arcillas de capa mixta pueden formarse debido a la intemperie que implica la eliminación o captación de cationes (por ejemplo, K), la alteración hidrotérmica o la eliminación de las capas intermedias de hidróxido. Las estructuras regularmente interestratificadas se identifican fácilmente por su reflexión basal (001), que corresponde a la suma de las separaciones de los componentes individuales y los picos subsiguientes de órdenes integrales superiores. Por ejemplo, la esmectita illita interestratificada regularmente, cuando está saturada con Mg y glicolada, se caracterizaría por un pico de difracción (001) a aproximadamente 27 angstroms, que corresponde a la suma de las separaciones de illita (10 angstroms) y esmectita (17 angstroms). A la inversa, las estructuras interestratificadas al azar tienen picos no integrales en posiciones intermedias entre los picos de las capas minerales individuales.

### **3.4.2 Método térmico de determinación de pérdida de masa por deshidroxilación (PPI)**

Para determinar las pérdidas y los contenidos de caolín equivalente en las muestras estudiadas:

- ❖ Se tomaron 100 g de muestra pulverizada y se colocó en un crisol de porcelana sin tapa, previamente pesada. El crisol debe estar libre de impurezas volátiles y debe ser capaz de resistir hasta 1000°C. El material no debe ocupar más de 2/3 de la altura de la cápsula.
- ❖ Se introdujo el crisol en una mufla y se calentó hasta 200°C durante una hora. Se extrajo y se colocó inmediatamente en una desecadora de vidrio hasta que alcanzó la temperatura ambiente, de forma que se evite

que la muestra absorba humedad durante el proceso de enfriamiento. Este proceso debe durar alrededor de 30 minutos. Luego se determinó la masa de la muestra, al sustraer la masa correspondiente a la cápsula y se registró el valor obtenido como  $m(200^{\circ}\text{C})$ .

- ❖ El crisol se introdujo nuevamente en la mufla y se calentó hasta  $350^{\circ}\text{C}$  durante una hora. Luego de calentadas a esa temperatura se aplicó el mismo procedimiento que se aplicó en el paso anterior. El valor obtenido se registró como  $m(350^{\circ}\text{C})$ .
- ❖ Luego se introdujo en la estufa y se calentó hasta  $750^{\circ}\text{C}$  durante una hora. Se aplicó el mismo procedimiento para enfriar la muestra y determinar su masa. Este valor se registró como  $m(750^{\circ}\text{C})$ .
- ❖ Nuevamente, se introdujo en la estufa y se calentó hasta  $800^{\circ}\text{C}$  durante una hora. Se aplicó el mismo procedimiento para enfriar la muestra y determinar su masa. Este valor se registró como  $m(800^{\circ}\text{C})$ .
- ❖ Por último, se introdujo en la estufa y se calienta hasta  $850^{\circ}\text{C}$  durante una hora. Se aplicó el mismo procedimiento para enfriar la muestra y determinar su masa. Este valor se registró como  $m(850^{\circ}\text{C})$ .

La expresión matemática utilizada para este cálculo se reporta en las siguientes ecuaciones, donde 13,96 es el contenido (% en masa) de grupos hidroxilos estructurales asociados a la capa octaédrica que corresponde teóricamente a la caolinita pura.

$$\%OH^{-} = \frac{m(350^{\circ}C) - m(850^{\circ}C)}{m(200^{\circ}C)} \cdot 100$$

$$K^E = \frac{\%OH^{-}}{13,96} \cdot 100$$

**Figura 18:** Fórmulas para el cálculo de caolín equivalente y pérdida de masa por deshidroxilación

### 3.4.3. Formulación de la mezcla de arcilla y arena

Para formular la mezcla de arcilla caolinítica de las escombreras de Dumañecos y arena del yacimiento El Rincón se estableció una suma

ponderando el porcentaje de aporte de la arcilla y la arena teniendo en cuenta los contenidos de caolín equivalente de cada material. Se empleó los resultados obtenidos a 850°C por ser la temperatura que reportó mayores valores de caolín equivalente. Para el cálculo ponderado se persiguió la disminución de la concentración de caolín equivalente en la arcilla a un 40 %, siendo esta una cantidad óptima para su empleo como MCS. Para el cálculo de los volúmenes necesarios para la mezcla se utilizó la siguiente fórmula.

$$MKe = ((AcKe * \%Acm) + (ArKe * \%Arm)) / 100$$

**MKe:** contenido total de caolín equivalente en la mezcla.

**AcKe:** contenido de caolín equivalente en arcilla caolinítica.

**ArKe:** contenido de caolín equivalente la arena.

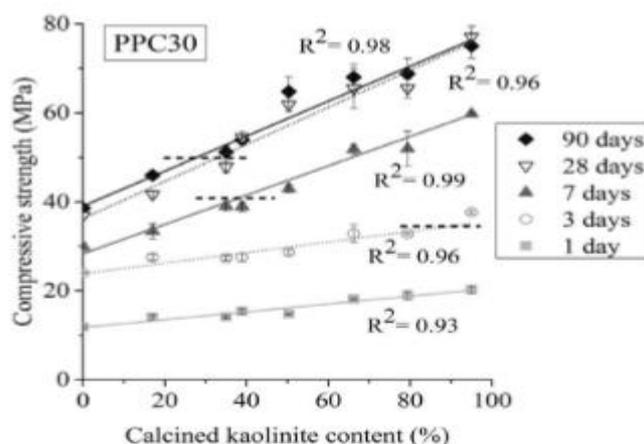
**%Acm:** porcentaje de arcilla caolinítica en la mezcla

**%Arm:** porcentaje de arena en la mezcla.

Según los contenidos de caolín equivalente identificados en estos materiales para lograr un 40 % de caolinita en la mezcla de arcillas de Dumañuecos y arena de El Rincón se estableció una dosificación de un 60 % de arcillas y un 40 % de arena.

#### **3.4.4 Determinación de la resistencia a la compresión mecánica para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet**

Este método es una nueva prueba rápida, pertinente y fidedigna para predecir la actividad puzolánica de arcillas calcinadas con contenido de caolinita extendiéndose desde 0 para 95 %. El método se fundamenta en los resultados de ensayos de más de 80 tipos de arcillas de Europa, América y en Cuba con los que se ha establecido una ecuación de correlación para determinar la resistencia a la compresión en morteros estandarizados para una dosificación de PPC30 a partir de los contenidos de caolín equivalente.



**Figura 19:** Gráfico de correlación de la resistencia a la compresión relativa a la mezcla PPC30 contra el contenido de caolín equivalente de las arcillas calcinadas (Avet et al. 2016)

La norma NC -506 se empleó para comparar con los resultados de resistencia a la compresión mecánica para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet

**Tabla 1:** Norma utilizada para comparar los valores de resistencia a la compresión determinados por la correlación (Comité Técnico de Normalización NC/CTN 22 de Cemento 2011)

Índice	Requisitos	UM	P - 35	P - 45	P - 55	Método de ensayo	
Físicos	Superficie específica Blaine (mín.)	cm <sup>2</sup> /g	2 800	2 900	3 200	NC EN 196-6	
	Tiempo fraguado inicial (mín.)	min	45	45	45	NC 524	
	Tiempo fraguado final (máx.)	h	10	10	10		
	Estabilidad de volumen por Le Chatelier (máx.)	mm	10	10	10	NC 504	
Mecánicos	Resistencia a la compresión (mín.)	(MPa)	3 días	17	25	25	NC 506
			7 días	25	35	35	
			28 días	35	45	55	
Químicos	Pérdida por ignición (máx.)	%	4,0	4,0	4,0	NC 507	
	Residuo insoluble (máx.)	%	4,0	4,0	4,0		
	Oxido de Magnesio (máx.)	%	5,0	5,0	5,0		
	Trióxido de Azufre (máx.)	%	3,5	3,5	3,5		

## **Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados.**

### **4.1 Análisis de los resultados de la caracterización química y mineralógica de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos**

#### **4.1.1 Resultados del análisis químico**

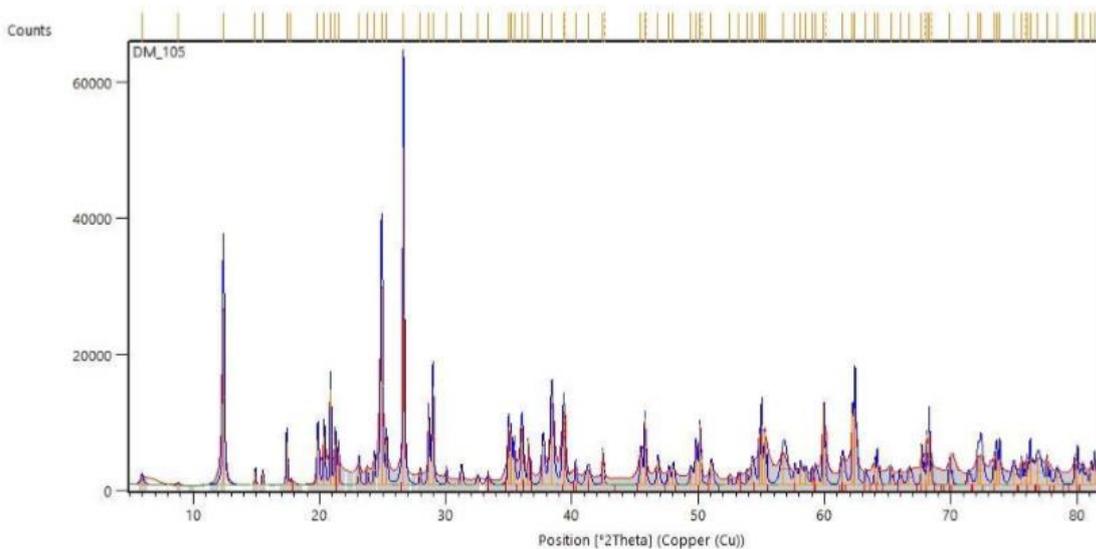
El análisis de los resultados químicos permitió establecer que la tendencia a la pérdida de masa por deshidroxilación es alta en el yacimiento Dumañuecos, por los altos contenidos de minerales del grupo de la caolinita. El contenido de óxido de calcio no se determinó y esto se debe a que estas arcillas se originaron por la alteración de rocas ácidas e intermedias, lo que propició que no se formaron carbonatos. Los valores de óxido de hierro son bajos. Los valores de potasio son elevados en comparación a los valores de sodio que son bajos, esto se debe a la presencia de feldespatos potásicos provenientes de las riolitas a partir de las que se formaron estas arcillas. Se determinaron valores relativamente altos de titanio. Se determinaron bajos valores de magnesio y manganeso que son característico de las rocas ácidas e intermedias de las que se formaron estas arcillas. Los valores de sílice son intermedios y están relacionados con las tobas y andesitas a partir de las cuales también se formaron arcillas en esta área. El contenido de alúmina es alto, esto está explicado por la abundancia de fases arcillosas y la presencia de micas, este contenido de aluminio es característico en rocas peraluminicas. Durante la determinación de los contenidos de azufre total no se pudo definir el número de oxidación por lo que se trata como azufre; en el reporte mineralógico en el que se determinó la presencia de jarosita, a la que se le atribuye parte de los valores elevados que se registraron de azufre. Utilizando coeficientes establecidos internacionalmente se calculó el posible contenido de  $\text{SO}_3$  y se utiliza como  $\text{SO}_x$  para establecerse en la tabla de contenidos químicos en óxidos. No se pudo determinar el estado de oxidación del carbono total, por lo que utilizando coeficientes establecidos internacionalmente se calculó como  $\text{CO}_x$ . Por los contenidos químicos identificados se puede decir que las rocas a partir de las cuales se formaron estas arcillas pertenecen a la serie calcoalcalina, donde son muy frecuentes las riolitas y las andesitas y que sufrieron procesos de alteración hidrotermal.

**Tabla 2: Resultados de la composición química determinada por Fluorescencia de Rayos X.**

<b>Compuesto</b>	<b>DM</b>
Na <sub>2</sub> O	0,05 %
MgO	0,36 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,83 %
SiO <sub>2</sub>	45,78 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02 %
K <sub>2</sub> O	1,19 %
CaO	ND
TiO <sub>2</sub>	1,13 %
MnO	0,01 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,30 %
CO <sub>x</sub>	0,51 %
SO <sub>x</sub>	3,59 %
PPI	15,51 %

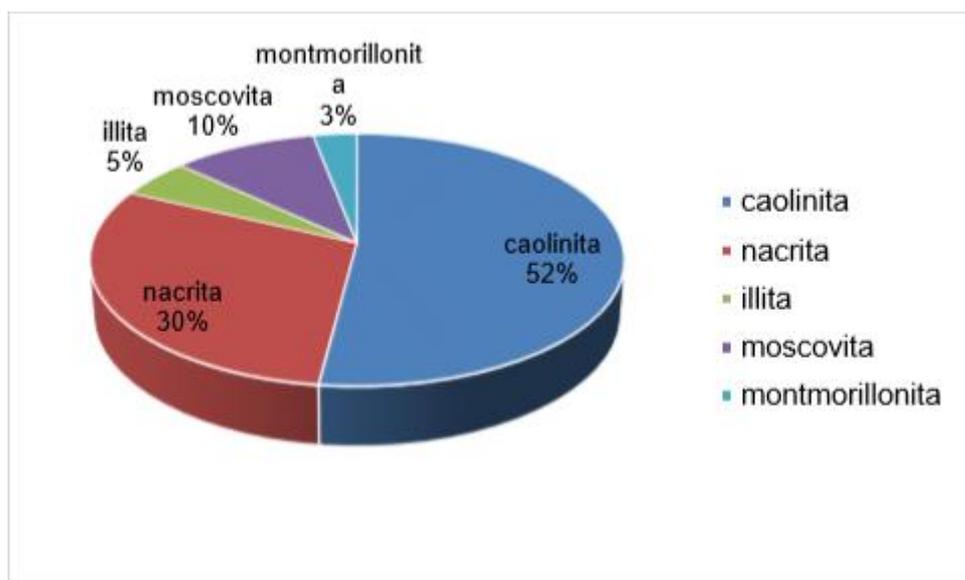
#### **4.1.2 Resultados del análisis mineralógico.**

El análisis de la fracción arcillosa permitió establecer la presencia de fases minerales del grupo caolinita, con reflejos fuertes entre los 7,11 y 7,19 angstroms, se determinaron picos específicos para caolinita a los 4,13 y 3,58 angstroms y 4,36 y 4,13 para la nacrita. Todos estos reflejos colapsan a 550°C. Las illitas dan reflejos típicos en la zona de los 10 angstroms que persisten luego del tratamiento térmico, y son apenas apreciables con el tratamiento con glicol. Se identificó además un reflejo intenso a los 3,35 típico del grupo de la illita. Los picos a 10,07 y 4,49 permiten hacer una diferenciación dentro del grupo de las micas para la moscovita.



**Figura 20: Difractograma de la difracción de Rayos X de las muestras arcillosas**

Por otro lado, se observan reflejos alrededor de los 11 angstroms, que se mueven a los 16,78 bajo los efectos de la atmosfera de glicol, atribuibles a la montmorillonita. Fue posible encontrar reflejos cercanos a los principales de la montmorillonita a 5,08, 2,73 y 3,07 angstroms, se asume una estructura desordenada (Figura 21). La cuantificación arrojó como resultados caolinita (52 %), nacrita (30 %) illita (5 %), moscovita (10 %) y montmorillonita (3 %) (Figura 25 (Tabla 3).



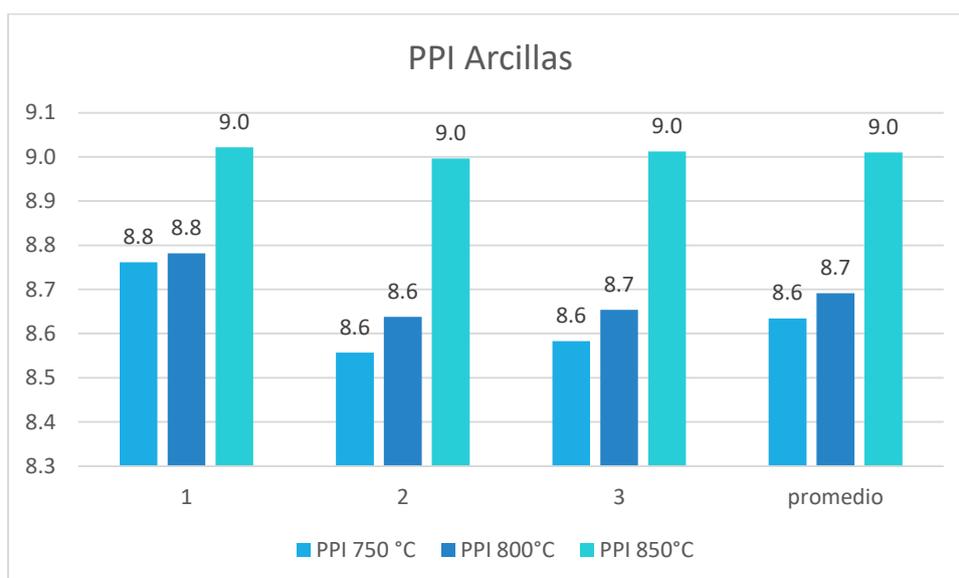
**Figura 21: Cuantificación de los minerales identificados**

**Tabla 3: Paragénesis mineral identificada en las arcillas**

No	Fases minerales	Fracción no arcillosa	Fracción arcillosa
1	Cuarzo	X	
2	Caolinita		X
3	Nacrita		X
4	Illita		X
5	Jarosita	X	
6	Montmorillonita		X
7	Moscovita	X	

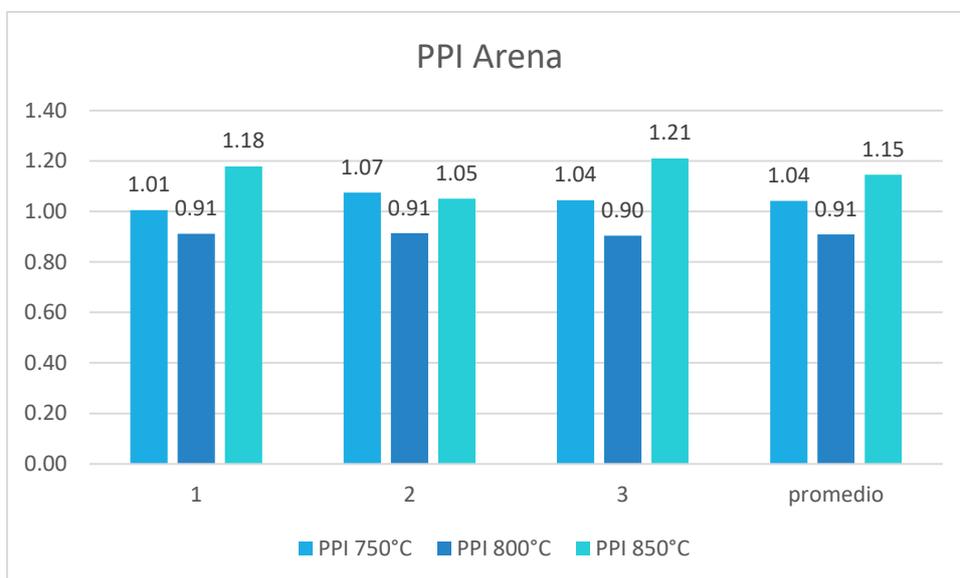
#### 4.2 Resultados de la determinación de las pérdidas de masa por deshidroxilación y los contenidos de caolín equivalente

Aplicando el análisis térmico en las muestras de arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos, se calcularon los valores de pérdida de masa por deshidroxilación. El valor de pérdida de masa por deshidroxilación más elevado registrado fue de 9.0 %, registrado a los 850°C. Las muestras reportaron un valor promedio de 8.7 % de pérdida de masa por deshidroxilación, esto es evidencia de la gran inestabilidad térmica que tienen los minerales que están dentro de las arcillas de estas muestras en el intervalo de 350°C a 850°C (Figura 27). Los valores elevados de pérdidas de masa por deshidroxilación están influenciados por la presencia de jarosita en estas arcillas.



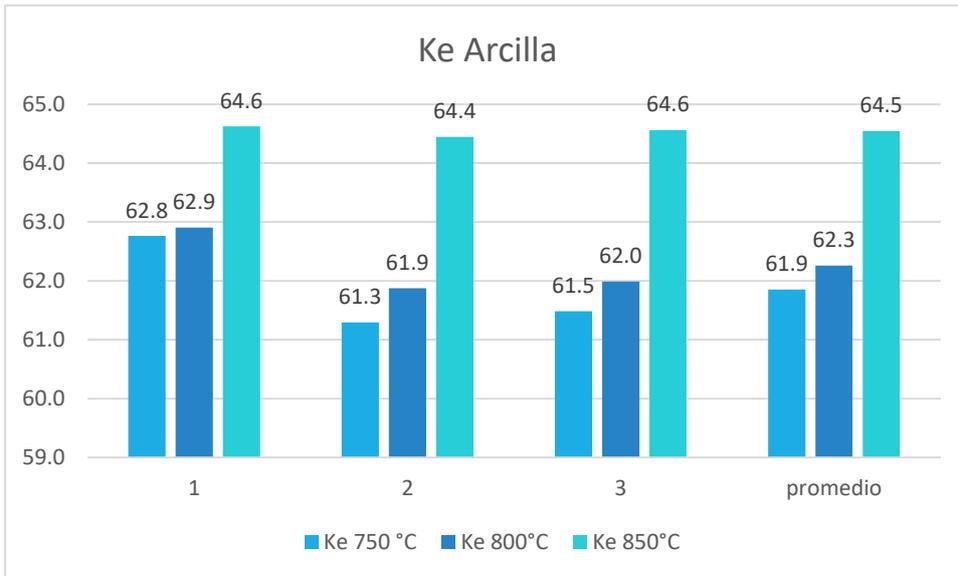
**Figura 22: Valores de pérdida de masa por deshidroxilación en arcillas.**

Aplicando el análisis térmico en las muestras de arena del yacimiento El Rincón, el valor por pérdida de masa por deshidroxilación más elevado registrado fue de 1.21 % registrado a los 850°C. Las muestras reportaron un valor promedio de 1.03 % de pérdida de masa por deshidroxilación, esto evidencia la estabilidad térmica que presentan los minerales dentro de las muestras de arena en el intervalo de 350°C a 850°C (Figura 23). Según el contexto geológico estas arenas deben tener un alto contenido de minerales félsicos predominando el cuarzo. Lo que explica la gran estabilidad térmica de estas muestras en el intervalo de activación.



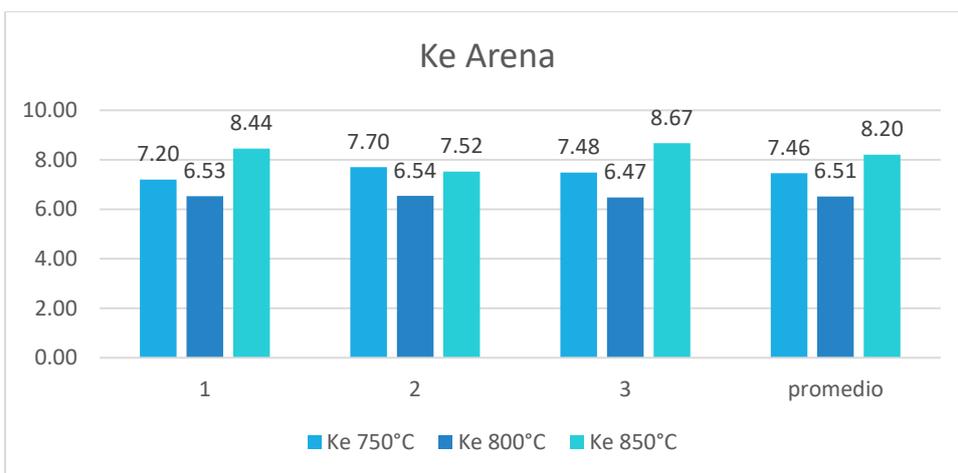
**Figura 23: Valores de pérdida de masa por deshidroxilación en arena.**

Luego de definir los valores de pérdida de masa por deshidroxilación se determinaron los contenidos de caolín equivalente presentes en las muestras de arcillas caoliníticas. El mayor contenido de caolín equivalente fue de 64,6, registrado a 850°C (Figura 24). Las muestras de arcillas caoliníticas reportaron un contenido promedio de 62,9 % de caolín equivalente, lo que indica el alto nivel de pureza de estas arcillas.



**Figura 24: Contenidos de caolín equivalente en arcillas**

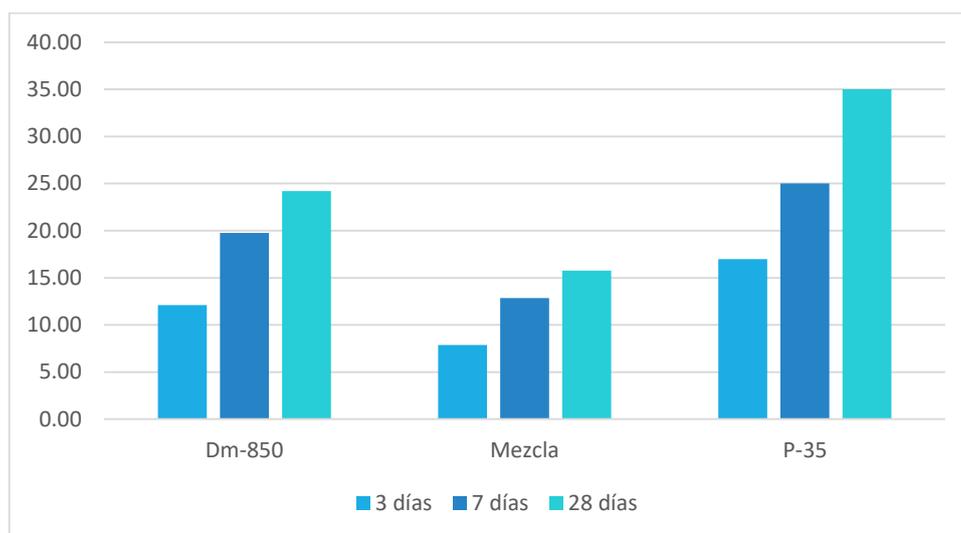
A partir del comportamiento de la pérdida de masa por deshidroxilación en la arena, se determinaron los contenidos de caolín equivalente presentes en las muestras. El mayor contenido de caolín equivalente registrado fue de 8.67 % a una temperatura de 850°C (Figura 25). Reportando un contenido promedio de 7.39 % de caolín equivalente. Según el reporte geológico, este yacimiento pertenece a rocas ácidas alteradas, donde a partir de estas se formaron minerales arcillosos por un proceso de meteorización.



**Figura 25: Contenidos de caolín equivalente en arena.**

### 4.3 Resultado del análisis de la resistencia a la compresión mecánica a partir del método de correlación de François Avet

Se pronosticó la resistencia de las arcillas a 850°C para los 3, 7 y 28 días según la metodología de François Avet para mezclas PCC 30 (Figura 26). Se empleó esta temperatura por ser la que reportó mayor contenido de Ke. Según los valores pronosticados esta arcilla reporta resistencias menores que los requerimientos establecidos por la norma cubana para cemento P-35. Se pudo pronosticar los valores de resistencias esperados para la mezcla de arcillas con arenas quedando en todas las etapas por debajo de la norma cubana para cemento P-35. El material resultante de la mezcla pronosticó resistencias por encima de 15 MPa a los 28 días por lo que pudiera ser empleado como mortero para la construcción.



**Figura 26: Correlación de la resistencia a la compresión para una dosificación de PPC 30 por el método de François Avet**

## Conclusiones

1. Según la caracterización química se determinaron bajos valores de sodio, magnesio, calcio, manganeso, hierro, carbono y fósforo y alta concentración de sílice y alúmina en las arcillas y valores elevados de titanio, potasio y azufre.
2. Se identificó que la paragénesis mineral típica de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos es cuarzo, caolinita, nacrita, illita, jarosita, montmorillonita y moscovita.
3. Las arcillas presentaron un valor promedio de pérdidas de masa por deshidroxilación de 8.7% y el contenido promedio de caolín equivalente determinado fue de 62.9 %.
4. En cuanto a las muestras de arena, estas presentaron un valor promedio de pérdidas de masa por deshidroxilación de 1.03 % y un 7.39 % de contenido de caolín equivalente.
5. Según la metodología de François Avet para mezclas PCC 30 se pronosticó los valores de resistencias quedando en todas las edades por debajo de la norma cubana para cemento P-35. El material resultante de la mezcla pronosticó resistencias por encima de 15 MPa a los 28 días por lo que pudiera ser empleado como mortero para la construcción.

## Bibliografía

1. Almenares-Reyes, R.S., Bassas-Noa, P.R. y Betancourt-Rodríguez, S., 2016. Evaluación de arcillas caoliníticas de Moa para la producción de cemento de base clínquer – arcilla calcinada – caliza (LC3) Evaluation of kaolinite clays of Moa for the production of cement based. *Minería y Geología*, vol. 32, no. 4, pp. 63-76.
2. Almenares Reyes, R.S., 2017. Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios. S.I.: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
3. Alujas, A., 2010. Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente. S.I.: Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas.
4. ASTM C – 311, 2008: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a mineral admixture in Portland-Cement Concrete.
5. ASTM C – 618, 2008: Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined Natural Pozzolans for use as a mineral admixture in Concrete.
6. Brocard Rivera, Y., 2011. Evaluación de mezclas de arcilla de la región de Centeno y arena sílice residual para su utilización en la industria cerámica. S.I.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. “Antonio Núñez Jiménez”.
7. Cortés, G.R.M., Kozevitch, V.F.J., Xavier, C., Hennies, W.T. Y Valenzuela, F.R., 2004. Propiedades cerámicas de caulins da República de Cuba. Parte III. Caulim Dumañuecos, 8 pp.
8. Cuenca Quintana, T., Caracterización minero-ambiental de la Empresa de Materiales para la Construcción de Las Tunas. Las Tunas: Universidad de Moa.
9. Damtoft, J.S., et al., Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 2008. 38: p. 115-127.
10. Day, R.L., Pozzolans for use in low-cost housing. A state of the art report, I.D.R. Centre, Editor. January 1992, University of Calgary, Canada.

11. Espinosa Borges, A.E., Evaluación de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos para la producción de cemento de bajo carbono. Las Tunas: Universidad de Moa.
12. Feria Ávila, H., 2004. Estudio de las variables climáticas de la provincia de Las Tunas. ,
13. Hevia Delgado, L.F., 1983. Informe final de Exploración Complementaria en el yacimiento de caolín Dumañuecos. Prov. Las Tunas. . Las Tunas.
14. Martirena JF. “Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa” [Doctorado]. Cuba: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas; 2003.
15. Murray, H. H. 2000: Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. Applied Clay Science, 17, 207-221 p
16. NC 506: 2013, 2013. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. . La Habana, Cuba.
17. Olivier, J.G.J., G. Janssens-Maenhout, and J.A.H.W. Peters, Trends in global CO2 emissions; 2012 Report. 2012: ISBN 978-92-79-25381-2. p. 42
18. Shi, C. & Day, R. L. 2001: Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans. Cement and Concrete Research, 31, 813-818 p.
19. Valdés, G.C., 1987. Proyecto de búsqueda detallada, exploración orientativa y detallada de caliza. Manatí, Provincia Las Tunas. S.I.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
20. Zamora, V.M., 2008. Geoquímica de las aguas subterráneas de La Provincia de Las Tunas. S.I.: s.n.

## Anexos



**Figura 27: Fotografía de Mufla eléctrica**    **Figura 28: Fotografía de Balanza analítica**



**Figura 29: Fotografía del Mortero de cerámica con arcilla y arena.**



**Figura 30: Fotografía de muestras para la Difracción de Rayos X**