



UMOA

Universidad de Moa
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

Ingeniería en Geología
Facultad de Geología-Minas
Universidad de Moa

TRABAJO DE DIPLOMA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO.

**Evaluación de las arcillas caoliníticas de las escombreras
del yacimiento Dumañuecos para la producción de
cemento de bajo carbono**

Autor: Angel Eduardo Espinosa Borges

Tutores:

Ing. Luis Alberto Pérez García

Dr. C. Carlos Alberto Leyva Rodríguez

Dr. C. Roger Samuel Almenares Reyes

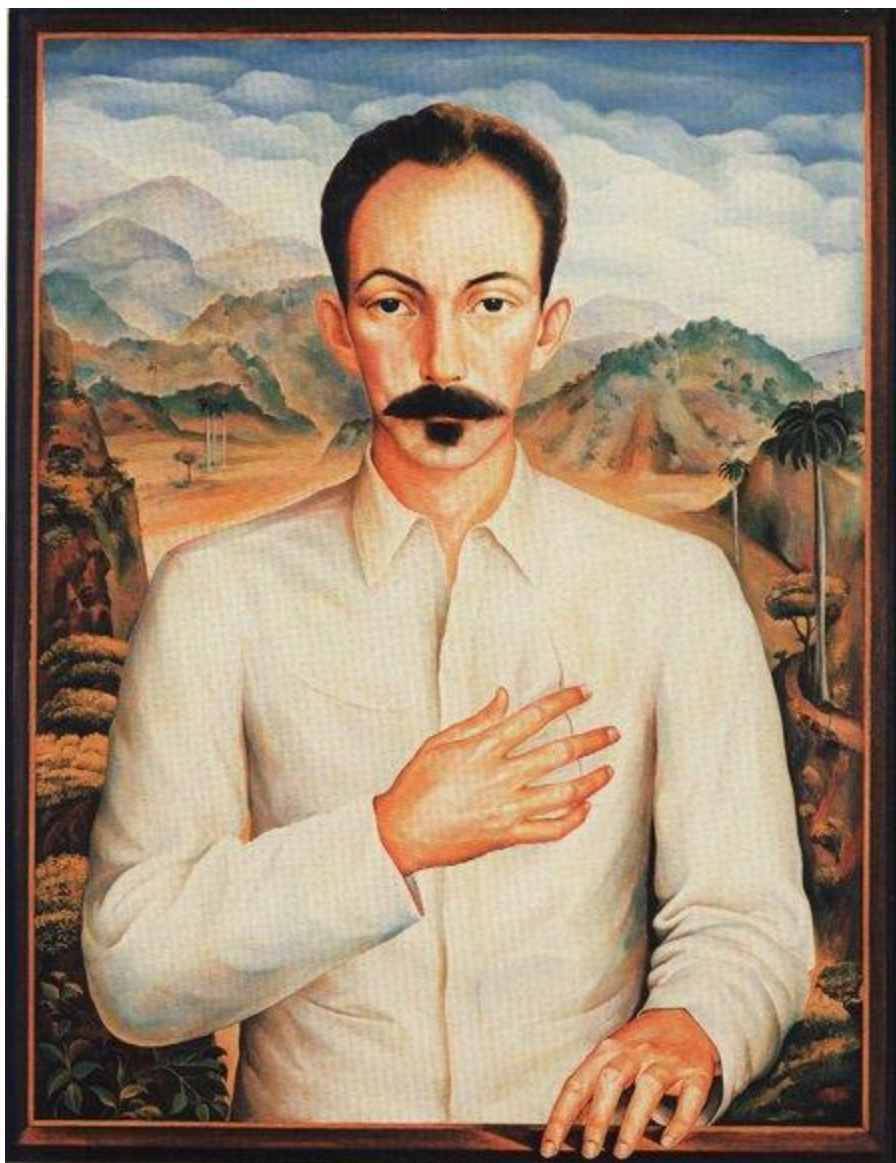
Cotutor:

Adrián Alujas Díaz

Moa, 2019



Pensamiento



“...Cuando uno sabe para qué sirve todo lo que da la Tierra... siente uno deseos de hacer más todavía; eso es la vida.”

Agradecimientos:

A mi tutor Luis Alberto que, aunque no ha podido estar junto a mí físicamente en esta etapa tan decisiva de mi formación siempre ha estado al alcance de un chat y me ha brindado más tiempo del que le pertenece.

A mi tutor Carlos Leyva por siempre preocuparse y ayudarme en todo momento. Por ofrecerme siempre sus invaluable consejos y su inmensa experiencia.

A mi tutor Roger por pasar la barrera de la carrera y brindarme sus ilimitados conocimientos sobre el tema y sin los que este trabajo no hubiera salido con la calidad requerida.

A María Eugenia y todos los colegas de la Empresa de Materiales de la Construcción de Las Tunas que le dieron un gran impulso a la investigación.

A los colegas de la Universidad de Las Tunas y en especial para Aramis y Laura que me apoyaron y trabajaron en la revisión de este trabajo.

A todos los profesores de la Universidad de Moa que de una manera u otra estuvieron involucrados en especial para Moraima y Yurisley gracias a los cuales se pudieron realizar algunos de los análisis que se presentan a continuación. También al colega Pedro por su colaboración y ayuda.

A los colegas del grupo de geotecnología de los materiales por su apoyo y preocupación y con los que he podido compartir los momentos más tensos y difíciles de esta investigación en especial Liván, Yosvany, Carlos y Alfredo.

A los colegas de la Oficina Nacional de Recursos Minerales en especial Arieski e Infante que me prestaron su ayuda e informaciones invaluable que viabilizaron esta investigación.

A todos lo que de una manera u otro estuvieron involucrados y que sin su invaluable apoyo no se hubiera podido concebir este trabajo y que por la brevedad no he podido mencionar.

Dedicatoria

A mi abuela Julia que, aunque en la actualidad la vida no permitió que estuviera conmigo en este momento en el que me realizo como ingeniero geólogo, este fue uno de sus mayores anhelos y siempre me apoyo en todas mis locuras.

A mi mamá por estar siempre a mi lado, aun cando me he encontrado lejos y por siempre tener esa visión del futuro tan prodigiosa que le permite tener siempre un consejo certero.

A mi papá por su apoyo y guía, siendo siempre un ejemplo a seguir para mí.

A mi tía Yanara por su preocupación y apoyo en todos los momentos de mi vida.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo la caracterización de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos para su evaluación como materia prima para la obtención de cemento de bajo carbono. Las muestras del yacimiento fueron caracterizadas química y mineralógicamente mediante técnicas de Difracción de Rayos X, Análisis Térmico Diferencial y Fluorescencia de Rayos X. Se calcularon los contenidos de caolín equivalente y se determinaron las pérdidas por ignición. Se realizaron análisis de actividad puzolánica mediante el método de solubilidad de aluminio y silicio y la correlación del contenido de caolín equivalente y 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. Además, 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. Se obtuvo un 96,2 % de caolín equivalente y un 13,4 % de pérdidas por ignición en el intervalo de 350 a 850°C. El análisis de reactividad puzolánica reveló que la temperatura óptima para la disolución en faces ricas en aluminio y silicio se obtuvo a los 800°C. Según el método de François Avet los valores de resistencia a la compresión pronosticados duplican los valores establecidos por la norma **NC-506**. Se evaluaron las arcillas según la metodología de Almenares Reyes del 2017 como arcillas de tipo IV, que pueden presentar contenidos variables de caolín equivalente y contenidos apreciables de minerales no arcillosos tales como sulfatos y sulfuros.

Abstract:

The objective of this work is the characterization of the kaolinitic clays of Dumañuecos deposit dumps for evaluation as raw material for obtaining low carbon cement. The samples of the deposit were characterized chemically and mineralogically by techniques of X-ray diffraction, differential thermal analysis and X-ray fluorescence. The contents of kaolin equivalent were calculated and losses by ignition were determined. Pozzolanic activity analyzes were performed by the aluminum and silicon solubility method and the equivalent kaolin correlation and the compressive strength. 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. In addition, high values of titanium, potassium and sulfur were determined. It was defined as general paragenesis composed of quartz, kaolinite, nacrite, illite, jarosite, montmorillonite and muscovite. 96.2% equivalent kaolin and 13.4% losses were obtained by ignition in the range of 350 to 850°C. The pozzolanic reactivity analysis revealed that the optimum temperature for dissolution in faces rich in aluminum and silicon was obtained at 800°C. According to the method of François Avet, the predicted compressive strength values double the values established by the **NC-506** standard. Clays were evaluated according to the methodology of Almenares Reyes of 2017 as clays of type IV, which may have variable contents of kaolin equivalent and appreciable content of non-clayey minerals such as sulfates and sulphides.

Índice:

INTRODUCCIÓN	- 12 -
Situación problemática	- 13 -
Problema	- 14 -
Objetivo general.....	- 14 -
Hipótesis	- 14 -
Objetivos específicos	- 14 -
Objeto	- 15 -
Campo de acción.....	- 15 -
MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL.....	- 15 -
Significados del término arcilla	- 15 -
Clasificación de las arcillas	- 16 -
Estructura y clasificación de los minerales arcillosos	- 17 -
Materiales Cementicios Suplementarios (MCS). Generalidades	- 18 -
Materiales Cementicios Suplementarios en Cuba	- 19 -
Auge en el interés de las arcillas calcinadas como MCS	- 20 -
Estudios realizados en Cuba.....	- 21 -
CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	- 23 -
1.1. Situación Geográfica	- 23 -
1.2. Relieve.....	- 23 -
1.3. Clima	- 24 -
1.4. Humedad relativa	- 24 -
1.5. Red hidrográfica.....	- 26 -
1.6. Vegetación	- 27 -
1.7. Desarrollo económico de la región	- 27 -
1.8. Características geológicas regionales	- 28 -
1.9. Estratigrafía regional.....	- 29 -
1.10. Tectónica	- 30 -
1.11. Geomorfología regional	- 31 -

1.12.	Características del vulcanismo regional	32 -
1.13.	Geología del área de estudio	33 -
1.14.	Génesis del yacimiento Dumañuecos	34 -
1.15.	Composición química	35 -
1.16.	Composición mineralógica	36 -
CAPÍTULO 2: MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS..		37 -
2.1.	Introducción	37 -
2.2.	Estado del arte	38 -
2.3.	Trabajos de campo y muestreos	41 -
2.4.	Preparación de las muestras y realización de los ensayos	47 -
2.4.1.	Preparación de las muestras	47 -
2.4.2.	Preparación para Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales	47 -
2.4.3.	Muestras para Fluorescencia de Rayos X y Análisis de Carbono Azufre	50 -
2.4.4.	Muestras para el análisis térmico y la pérdida de masa por deshidroxilación-	51 -
2.5.	Métodos de análisis	52 -
2.5.1.	Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales	52 -
2.5.2.	Análisis Térmico Diferencial	55 -
2.5.3.	Método térmico de determinación de pérdida de masa por deshidroxilación (PPI)	55 -
2.5.4.	Metodología de Almenares Reyes del 2017	57 -
2.5.5.	Determinación de la actividad puzolánica a partir de la concentración de aluminio y silicio disueltos en álcalis	58 -
2.5.6.	Determinación de la resistencia a la compresión mecánica en morteros normalizados para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet	59 -
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		61 -
3.1.	Análisis de los resultados de la caracterización química y mineralógica de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos	61 -
3.1.1.	Resultados del análisis químico	61 -
3.1.2.	Resultados del análisis mineralógico	62 -

3.1.3. Resultados del análisis térmico diferencial	- 64 -
3.2. Resultados de la determinación de las pérdidas de masa por deshidroxilación y los contenidos de caolín equivalente	- 65 -
3.3. Evaluación de la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la reactividad puzolánica	- 67 -
3.4. Resultado del análisis de la resistencia a la compresión mecánica a partir del método de correlación de François Avet.....	- 69 -
3.5. Evaluación de las potencialidades según la metodología de Almenares Reyes del 2017 -	69 -
CONCLUSIONES.....	- 73 -
RECOMENDACIONES	- 74 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 75 -

Índice de Figuras:

<i>Figura 1: Estructura interna de los minerales del grupo de las arcillas</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Figura 2: Esquema de ubicación geográfica Fuente: Elaboración propia</i>	<i>- 23 -</i>
<i>Figura 3: Esquema de elevaciones del Municipio Manatí Fuente: Elaboración propia</i>	<i>- 24 -</i>
<i>Figura 4: Mapa de Índice de precipitación estandarizado Enero-Junio/13 Norma: 1971-2000 de la Provincia de Las Tunas del segundo semestre del año 2018 (Grupos de Pronóstico 2019).....</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Figura 5: Red hidrográfica de Manatí Fuente: Elaboración propia</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Figura 6: Estructura hidrogeológica de Las Tunas (Vázquez Fernández. E 2007)</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Figura 7: Mapa geológico de la provincia de Las Tunas (Vázquez Fernández. E 2007)</i>	<i>- 28 -</i>
<i>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 1:100000 del año 2017.....</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Figura 9: Esquema Topográfico de Dumañuecos generado a partir del MDT del municipio Manatí y una imagen satelital en el GLOBAL MAPER y el QGis.</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Figura 10: Mapa esquemático de las Unidades Lito-Estratigráficas de Manatí modificado a partir del mapa geológico del IGP escala 1:100000 del año 2017</i>	<i>- 33 -</i>

<i>Figura 11: Esquema geológico de Manatí modificado a partir del mapa geológico del IGP escala 1:100000 del año 2017.....</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Figura 12: Etapas de la investigación</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Figura 13: Vista panorámica del yacimiento actual Dumañuecos</i>	<i>- 43 -</i>
<i>Figura 14: Arcillas caoliníticas blancas rodeadas por rocas ácidas oxidadas superficialmente...</i>	<i>- 44 -</i>
<i>Figura 15: Detalle del surco de muestreo en escombrera</i>	<i>- 45 -</i>
<i>Figura 16: Escombrera</i>	<i>- 46 -</i>
<i>Figura 17: Perforación pozo 1</i>	<i>- 47 -</i>
<i>Figura 18: Paquetes de muestras</i>	<i>- 47 -</i>
<i>Figura 19: Cuarteo en bandejas.....</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Figura 20: Molino de anillos</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Figura 21: Mufla con ventilación interna y mortero de ágata</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Figura 22: Máquina de ultrasonido y muestras en disolución con rápido asentamiento de la fracción no arcillosa</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Figura 23: Diferentes series texturales</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Figura 24: Muestras para la Difracción de Rayos X.....</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Figura 25: Horno eléctrico y desecadora de vidrio.....</i>	<i>- 56 -</i>
<i>Figura 26: Formulas para el cálculo de caolín equivalente y pérdida de masa por deshidroxilación..</i>	<i>56 -</i>
<i>Figura 27: Clasificación de arcillas de acuerdo a su potencial (Almenares Reyes 2017)</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Figura 28: Mezcla de arcilla en NaOH y disolución de NaOH a 0.5 mol/L</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Figura 29: 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)</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Figura 30: Difractograma de la Difracción de Rayos X de las muestras arcillosas</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Figura 31: Cuantificación de los minerales identificados</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Figura 32: Difractograma de la Difracción de Rayos X Diferenciales superpuestos</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Figura 33: Resultado del Análisis Térmico Diferencial</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Figura 34: Valores de pérdida de masa por deshidroxilación.....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Figura 35: Contenidos de caolín equivalente.....</i>	<i>- 67 -</i>

<i>Figura 36: Valores de alúmina y sílice disueltos</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Figura 37: Relación entre el contenido de caolinita equivalente y el Al soluble</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Figura 38: Correlación de la resistencia a la compresión para una dosificación de PPC30 por el método de François Avet</i>	<i>- 69 -</i>
<i>Figura 39: Potencialidades de las arcillas de Dumañuecos</i>	<i>- 71 -</i>

Índice de Tablas:

<i>Tabla 1: Criterios límites con los valores determinados (Almenares Reyes 2017)</i>	<i>- 57 -</i>
<i>Tabla 2: Requisitos químicos de la norma NC-Ts528 del 2007.....</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Tabla 3: 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).....</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Tabla 4: Resultados de la composición química determinada por Fluorescencia de Rayos X</i>	<i>- 62 -</i>
<i>Tabla 5: Paragénesis mineral identificada en las arcillas</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Tabla 6: Resultados de la calcinación.....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Tabla 7: Tabla de comparación de los criterio límite establecido por Almenares Reyes contra los valores determinados en las muestras de arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos</i>	<i>- 70 -</i>

INTRODUCCIÓN

El cemento es un material inorgánico, no metálico, finamente molido que cuando se mezcla con agua y áridos forma una pasta que fragua y endurece (morteros y hormigones). Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de silicatos cálcicos hidratados como resultado de una reacción entre el agua y los constituyentes del cemento. Esta propiedad de aglomerante hidráulico le ha convertido en un material básico de construcción, imprescindible para la edificación y la realización de infraestructuras. El cemento Portland fue patentado en 1824, y es el cemento más ampliamente empleado en la actualidad en la fabricación del hormigón y su consumo y producción están directamente relacionados con la marcha del sector de la construcción (Vera Lazcano 2018).

El comercio mundial de cemento supone tan sólo el 6-7% de la producción, en su mayoría transportado por mar. Hay generalmente poca importación y exportación de cemento, principalmente como resultado del alto costo del transporte por carretera, (los suministros de cemento por carretera suelen ser por lo general a distancias no mayores de 150 km). Su proceso de producción es considerado el responsable de entre 5-8 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, debido a los elevados volúmenes de producción a escala global (Müller y Harnisch 2008), además de algunos autores como Taylor, Tam, and Dolf (2006) y EIA (2013) demuestran que puede ser una industria altamente consumidora de energía, con alrededor de 6 % del consumo de energía total en el sector industrial (Cisnero 2010).

Las principales razones por las que el cemento promete seguir siendo el aglomerante más importante en el sector de la construcción, es debido a que las materias primas para su producción son geológicamente extensas y abundantes, y su agotamiento es poco probable en los próximos años (U.S. 2017) y (Tironi et al. 2012).

La reducción del factor de clínker en el cemento, a través del empleo de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) es una de las alternativas más prometedoras, para su desarrollo a corto y a mediano plazo, entre las definidas

por la industria del cemento para lograr la sostenibilidad ecológica y medio ambiental de su producción (WBCSD y IEA 2009; WBCSD 2015). Diferentes subproductos industriales y materiales naturales pueden ser utilizados en la sustitución parcial de clínker en el cemento (CEMBUREAU 2013). De este modo se reducen los volúmenes de clínker en el aglomerante y el consumo específico de energía y se logran mitigar las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de producción.

La producción de cemento mundial crece de forma espectacular. Esta alcanzó en el año 2002, 1.75 109 t, con un crecimiento promedio anual del 3,5 %, medido desde 1970 (Hendriks et al. 2004), (Roessler y Stark 2003). Estos volúmenes de producción deberán seguir aumentando en los próximos años, con estimados de crecimiento entre el 120-180 % para el año 2020 (Vanderley 2002).

Cuba no se queda fuera de estos problemas que existen hoy en el mundo, por eso, en estudios realizados por el CIDEM con la Escuela Politécnica Suiza de Lausana y la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas se ha desarrollado una nueva fórmula para la producción de cemento que permite la sustitución de clínker por arcilla caolinítica calcinada. Debido a esto se hace fundamental la evaluación de los principales tipos genéticos de yacimientos de arcillas caolinítica conocidos en el país con ese fin.

El yacimiento Dumañuecos fue explotado en tiempos pasados con fines cerámicos, por lo que se conoce que posee elevados volúmenes de arcillas caolinítica en escombreras, con contenidos favorables de caolín equivalente para la producción de cemento de bajo carbono (LC³). En vista que estas arcillas carecen de estudios con esta finalidad, se hace imprescindible realizar la evaluación de estas arcillas caoliníticas, teniendo en cuenta que su origen es hidrotermal.

Situación problemática

- La caracterización de las muestras de arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos es el primer y más importante paso para la disseminación de la tecnología del cemento de bajo carbono en Las Tunas. En

la actualidad el yacimiento se encuentra en cierre pues la reserva de caolín puro fue agotada, sin embargo, existe un gran número de escombreras que poseen altas perspectivas para la producción de cemento de bajo carbono por los elevados contenidos de caolín equivalente. Por esto se hace fundamental el estudio de la composición química y mineralógica de estas arcillas, para evaluar cómo se comportan las fases minerales principales y acompañantes a la hora de la calcinación y mezcla; teniendo en cuenta la génesis geológica del yacimiento.

Problema

- ¿Cómo se relacionan las características químicas y mineralógicas de las escombreras del yacimiento de arcillas caoliníticas de Dumañuecos y su utilización potencial para la producción de cemento de bajo carbono?

Objetivo general

- Caracterizar las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos para su evaluación como materia prima para la obtención de cemento de bajo carbono.

Hipótesis

- Si se realiza la caracterización de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos según la metodología de Almenares Reyes del 2017 se podrá determinar la influencia de la composición química, mineralógica, el comportamiento térmico, la pérdida de masa por deshidroxilación y el contenido de caolín equivalente, lo que permitirá evaluar si estas arcillas pueden ser utilizadas como fuente de materia prima para la producción de cemento de bajo carbono.

Objetivos específicos

- Caracterizar química y mineralógicamente las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos.
- Valorar las pérdidas de masa por deshidroxilación y el contenido de caolín equivalente.

- Evaluar la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la reactividad puzolánica.
- Evaluar la resistencia a la compresión mecánica a partir del método de correlación de François Avet.
- Evaluar las potencialidades de las arcillas según la metodología de Almenares Reyes del 2017.

Objeto

- Las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos.

Campo de acción

- Estudio de las propiedades químicas, mineralógicas y geológicas de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos.

MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL

Para este trabajo se asume que las pérdidas por ignición son equivalentes a las pérdidas de masa por deshidroxilación (PPI). A partir de ahora el colín equivalente se expresará como Ke y CP cemento Portland.

Significados del término arcilla

- 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 μm).
- 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 μm .
- Para un ceramista una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica. Desde el punto de vista económico las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones.

- La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes 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.
- Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. En la fracción textural de arcilla puede haber partículas no minerales, los fitolitos. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Son el producto de disgregación total o parcial de las rocas ígneas por acción del agua y los agentes atmosféricos (en especial el dióxido de carbono). En el proceso de generación de las arcillas estas se ven sometidas durante largos períodos de tiempo a temperaturas y presiones determinadas. Por esta razón el término industrial de la arcilla no corresponde a una composición química o mineralógica definida; las arcillas son mezcla de diversas especies minerales, esto dependerá de la composición de la roca madre de partida. Esto hace muy complicado el estudio de las mismas y la evaluación de los yacimientos que, por el mismo motivo, presentan una elevada heterogeneidad. El término caolín, sin ser mucho más preciso, designa a una arcilla con un elevado porcentaje de caolinita (mínimo 80 %) y con un bajo contenido de impurezas, especialmente, en el contenido de óxido de hierro. La composición teórica de la caolinita es: Alúmina (Al_2O_3): 39,56 %, óxido de silicio (SiO_2): 46,54 %, y agua (H_2O): 13,90 % en masa. En las arcillas naturales dichos porcentajes son distintos por la presencia de otros minerales y de impurezas como son: el óxido de titanio, calcio, magnesio, potasio, sodio y hierro (Díaz Álvarez 2014, p. 16).

Clasificación de las arcillas

Se pueden distinguir entre primarias las del tipo hipogénico y residuales que permanecieron en el mismo lugar de su formación y las secundarias que fueron acarreadas a lugares diferentes al de su origen.

Fluviales: depositadas por ríos y siendo la mayor parte depósitos de baja calidad.

Lacustres: asentados en lagos y estando en capas uniformes de buena calidad.

En deltas: son arenosas y de composición irregular.

Glaciales: formadas por la acción de grandes masas de hielo sobre rocas cristalinas.

De acuerdo con su plasticidad

Arcillas plásticas: Presentan alta plasticidad las arcillas bentoníticas y mormonilloníticas.

Poco plásticas: Presentan esta característica las arcillas esmécticas, que absorbe las grasas.

Estructura y clasificación de los minerales arcillosos

Los minerales arcillosos están formados por una estructura en forma de capas apiladas compuestas por una serie de planos paralelos de grupos de sílice tetraédricos y grupos de alúmina octaédricos dispuestos alternadamente. Los grupos del mismo tipo están unidos entre sí hexagonalmente formando capas de tetraedros $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$ y octaedros $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$ (estructura tipo gibbsita) o $\text{Mg}_3(\text{OH})_4^{2+}$ (estructura tipo brucita). Los minerales arcillosos que presentan un empaquetamiento de una capa tetraédrica y una octaédrica se denomina de tipo 1:1, y aquellos que presentan una octaédrica entre dos tetraédricas, de tipo 2:1. Si el ion predominante en la capa octaédrica es divalente, como es el caso del Mg^{2+} , se ocuparán todas las cavidades y se tiene una configuración trioctaédrica, pero si el catión predominante en la capa octaédrica es trivalente, solo se ocuparán como promedio $2/3$ de las cavidades octaédricas, dando lugar a la estructura dioctaédrica (Figura 1).

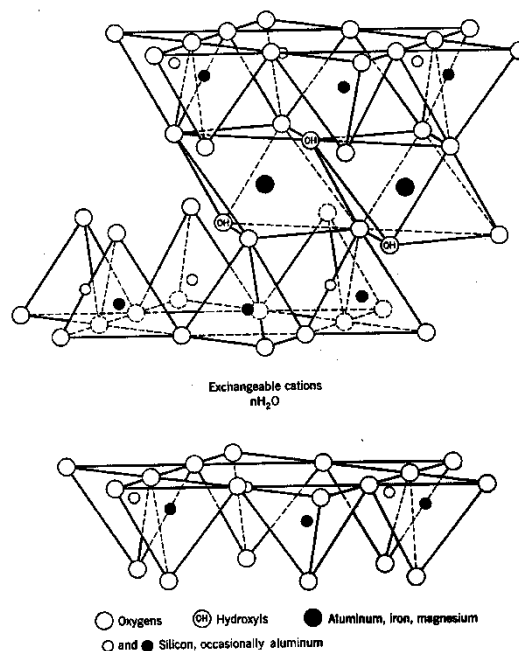


Figura 1: Estructura interna de los minerales del grupo de las arcillas

Materiales Cementicios Suplementarios (MCS). Generalidades

Los materiales que se emplean actualmente en la industria de la construcción tienen sus raíces en el mundo antiguo, donde ya se utilizaban mezclas para mejorar las propiedades de dichos productos. Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo XX, la sustitución parcial del cemento Pórtland por materiales naturales o artificiales adquirió una renovada atención.

El interés más reciente está enfocado principalmente a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del proceso de tratamiento de la roca caliza para la obtención del clínquer, principal componente del CP. La sustitución de una parte de clínquer con MCS está reconocida como la manera más efectiva de reducir las emisiones de dióxido de carbono y disminuir los gastos energéticos asociados a la producción del cemento, manteniendo o mejorando simultáneamente las propiedades del hormigón.

Los MCS son un conjunto de materiales que muestran actividad hidráulica o puzolánica, o ambas, y de esta forma mejoran las propiedades de los productos finales del cemento. Esta definición general de MCS incluye un gran número de

materiales los cuales tienen grandes diferencias en lo que respecta a su origen, su composición química y mineral, así como las características de sus partículas. Se distinguen dos categorías generales: aquellas que poseen origen natural y las artificiales creadas por el hombre. El primer grupo consiste en materiales que pueden ser utilizados como MCS en la forma que naturalmente se presentan; en muchos casos, ellos solo necesitan preparación para obtener un tamaño de partículas adecuado. El segundo grupo incluye a los de origen artificial, materiales que han sido sometidos a modificaciones químicas y estructurales. En cada uno existe gran variabilidad en las propiedades físico-químicas, lo cual se debe al origen de cada MCS.

Las cenizas y tobas volcánicas, pumitas o piedra pómez y tierras diatomeas, son los ejemplos más comunes de puzolanas naturales. Otro de los materiales naturales que ha sido introducido como material cementicio suplementario en pequeñas cantidades es la caliza pulverizada sin calcinar. Entre las puzolanas artificiales más comunes se incluyen los subproductos o desechos de procesos industriales como son las cenizas volantes, las escorias granuladas de alto horno, y el humo de sílice; a este grupo se les suman las pizarras y 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.

El empleo de MCS garantiza una disminución de los gastos en combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero durante la producción de este. A ello contribuye su amplia disponibilidad en casi todas las regiones. De ahí el interés creciente en su utilización como sustituyentes parciales del clínquer y en el estudio de cómo sus propiedades físico-químicas influyen los productos finales del cemento Pórtland (Almenares Reyes 2017).

Materiales Cementicios Suplementarios en Cuba

En Cuba, particularmente, no se produce energía a partir de carbón a gran escala y no existen tecnologías metalúrgicas de las cuales se obtengan subproductos como las escorias granuladas de alto horno, las cenizas volantes y el humo de sílice, por lo que estos materiales no deben ser considerados como una fuente alternativa de MCS.

Las puzolanas naturales, siendo las tobas volcánicas, vítreas y zeolitizadas, y las pumitas o piedra pómez las más conocidas, también constituyen otro de los sustitutos empleados en la producción de cemento con una amplia disponibilidad en Cuba, pero debe señalarse que el desempeño físico–mecánico de los cementos con estas adiciones a edades tempranas es generalmente bajo, aunque se pueden alcanzar mayores prestaciones si la finura de estos se incrementa.

El metacaolín producido a partir de la calcinación de arcillas con alto contenido de caolinita y bajos niveles de impurezas, denominados comúnmente como caolines industriales, ha constituido otra de las alternativas valoradas como MCS a escala industrial, con prestaciones similares o superiores a las del humo de sílice, las cenizas volantes y la mayoría de las puzolanas naturales. Sin embargo, su uso a gran escala se ve 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, que también utilizan los depósitos de arcillas caoliníticas de alta pureza como fuente de materias primas. Estos aspectos también se aplican al caso de nuestro país.

Auge en el interés de las arcillas calcinadas como MCS

Entre la amplia variedad de materiales cementicios suplementarios que pueden ser empleados para reemplazar parte del clínquer en el aglomerante, existe creciente interés en el empleo de las arcillas activadas térmicamente, especialmente de los minerales arcillosos del grupo de la caolinita. Esto incluye no solo los yacimientos de arcillas caoliníticas de alta pureza, relativamente escasos y con alta demanda, principalmente por la industria del papel y la cerámica, sino también los depósitos con contenidos moderados de arcillas caoliníticas.

El estudio de estas como fuente de materiales cementicios suplementarios en la industria del cemento se ha incrementado en los últimos años, basado en sus favorables propiedades tecnológicas, reducción de los costos del cemento y del impacto negativo sobre el medio ambiente. Influyen, además, aspectos como la alta reactividad puzolánica de sus productos de calcinación y sus relativamente bajas temperaturas de activación. Investigaciones recientes han demostrado la posibilidad de obtener a partir de arcillas con solo un 40 % de caolinita un material

reactivo con un comportamiento similar al metacaolín comercial, que permite sustituciones de hasta un 30 % en peso de CP en el aglomerante. Este tipo de depósitos arcillosos, con contenidos moderados de arcillas caoliníticas, son muy abundantes en las zonas tropicales y subtropicales donde se concentra la demanda de materiales cementicios y donde sus recursos probables deben exceder los miles de millones de toneladas. Es por ello que se considera de manera general que las arcillas calcinadas constituyen el grupo de MCS con mayores potencialidades en los próximos años.

La localización de Cuba en un área climática que favorece la formación de arcillas caoliníticas como resultado del proceso de meteorización, y la presencia documentada de depósitos de arcillas caoliníticas de génesis hidrotermal y redepositados, permite inferir que las arcillas caoliníticas deben de ser relativamente abundantes en el país.

En Cuba, las arcillas calcinadas se presentan como una alternativa con excelentes potencialidades para la mitigación del impacto ambiental de la industria del cemento cubana y para suplir la creciente demanda nacional. Sin embargo, la falta de conocimiento acerca de la disponibilidad y características de los depósitos de arcillas caoliníticas existentes en Cuba capaces de ser utilizados como fuente de materia prima en la producción de puzolanas a escala industrial, constituye una de las principales limitantes para el desarrollo, producción y utilización de este tipo de materiales.

Estudios realizados en Cuba

En Cuba se han realizado múltiples y variados estudios sobre las arcillas, pero solo en fechas recientes se han comenzado a estudiar las potencialidades de estos materiales como fuente de MCS. Sin embargo, un proyectado incremento de la producción de cementos con altos volúmenes de sustitución de clínquer en el país a partir del empleo de arcillas calcinadas demanda necesariamente de una profundización en el estudio de los yacimientos arcillosos cubanos como fuente de materiales puzolánicos.

La falta de estudios acerca de la disponibilidad de fuentes de material arcilloso con posibilidades de ser utilizado como fuente de MCS es una de las principales limitantes encontradas para la producción generalizada de este tipo de aglomerante en el país. Esta problemática está vinculada a que los datos disponibles del Instituto de Geología y Paleontología y la Oficina Nacional de Recursos Minerales consideran las reservas de arcillas caoliníticas como bajas. Sin embargo, estos cálculos han estado limitados a la identificación y cálculo de reservas de aquellas arcillas capaces de satisfacer las características demandadas por las industrias de la cerámica, refractarios y la producción de cemento blanco, que requieren de depósitos de arcillas de alto contenido de caolinita y/o bajo contenido de hierro, consideraciones que no son limitantes para la producción de MCS. Es por ello que el estudio de aquellos depósitos de arcillas caoliníticas con determinados volúmenes de impurezas, pero cuyo contenido de minerales arcillosos justifica su empleo como MCS a partir de su activación térmica, resulta una apremiante necesidad para satisfacer la demanda de cemento a partir del diseño de estrategias que permitan alcanzar altos volúmenes de sustitución del clínquer, disminuir los costos de producción, mitigar las emisiones CO₂, y en la medida de lo posible aprovechar las tecnologías existentes sin grandes inversiones de capital. Extender estos estudios permitirá, además, tener un mayor grado de conocimiento de las reservas existentes en todo el país.

CAPÍTULO 1: CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1. Situación 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 2).

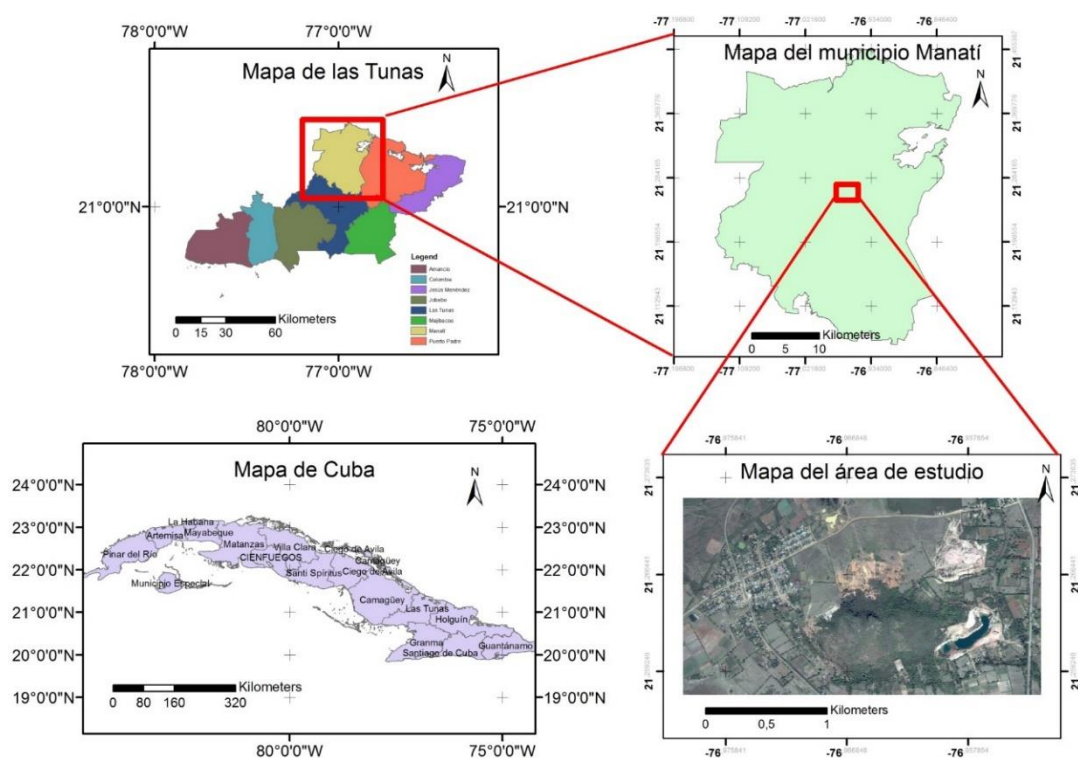


Figura 2: Esquema de ubicación geográfica Fuente: Elaboración propia

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 40m, ya en el área costera que bordea la bahía la llanura es laguno-palustre con cotas entre 5 y 10m. En la parte periférica exterior de la zona la llanura es abrasiva denudativa, diseccionada con cotas entre 20 y 40m. Al sur esta llanura está limitada por el peniplano Florida-Camagüey-Tunas (Valdés 1987) (Figura 3).

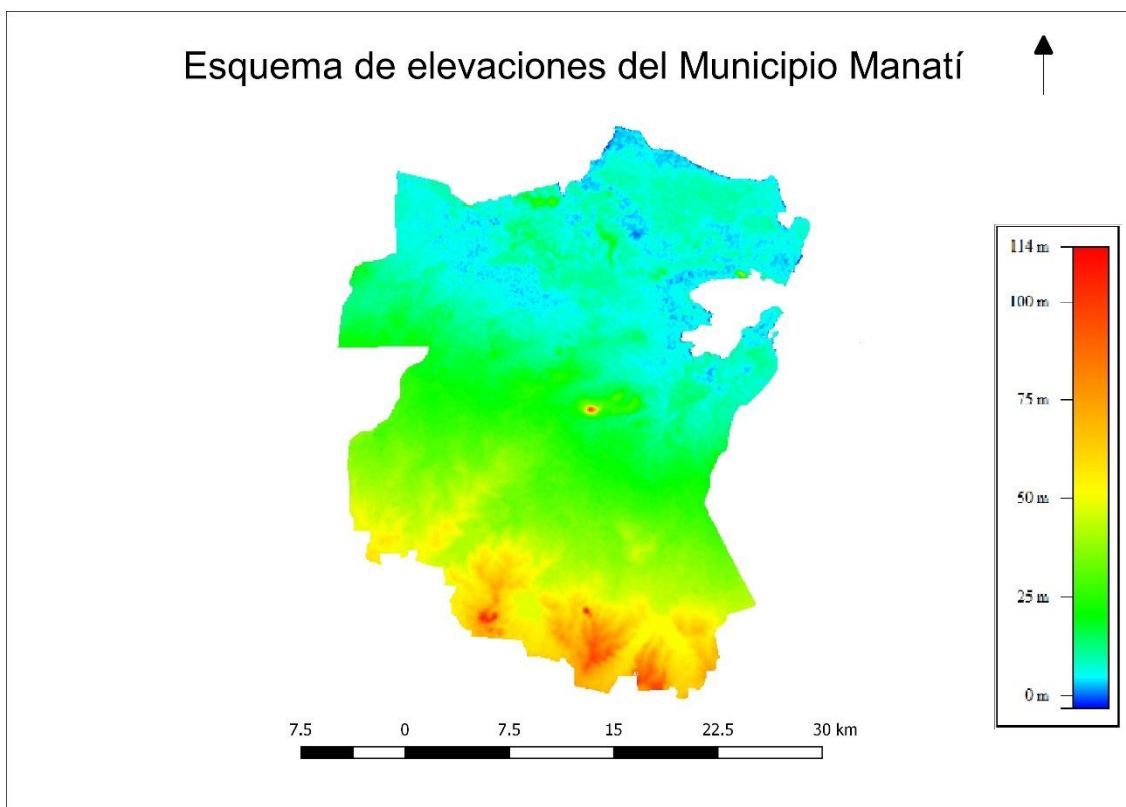


Figura 3: Esquema de elevaciones del Municipio Manatí Fuente: Elaboración propia

1.3. Clima

El clima que predomina en Las Tunas es tropical de sabana. Las temperaturas máximas promedio registradas son 27,4°C y las mínimas promedias 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 2379 y más de 2780 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, con promedios de velocidades que oscilan entre 7,7 y 13,7 Km/h (Feria Ávila 2004, p. 17).

1.4. Humedad relativa

Las precipitaciones atmosféricas experimentan grandes cambios en el tiempo y el espacio, debido a la influencia de la circulación atmosférica, el carácter de la superficie terrestre y las aguas marinas. El promedio mensual expresa una marcada diferencia entre los períodos lluvioso y seco. Los valores máximos se

observan en mayo con 180 mm y mínimos en junio con 100mm. Los meses más secos son diciembre y enero, que no superan los 20 mm.

Se aprecia que el promedio anual de evaporación en la provincia es elevado, superior a los valores de precipitación registrados lo que se debe a la combinación de tres factores fundamentales; una elevada radiación solar de 16,5 y mas de 17 MJ/m², velocidades del viento entre 10,2 y 11Km/h y la humedad relativa oscila entre 90 y más del 95 %, siendo una de las más altas del país, lo que repercute directamente en los escasos valores de precipitación media anual que predomina en la provincia (Zamora 2008, p. 38).

La humedad relativa promedio relativa de le la región es de un 60 %, con un promedio anual de temperaturas entre 25-26°C y con oscilaciones entre 10-34°C. La temperatura máxima absoluta del aire es de 37-38°C, la temperatura mínima absoluta del aire es de 10°C, la temperatura media mensual del aire a partir de julio en los meses de verano es de 27-28°C (Figura 4) y la temperatura media mensual del aire a partir de enero en los meses de invierno es de 23-24°C.

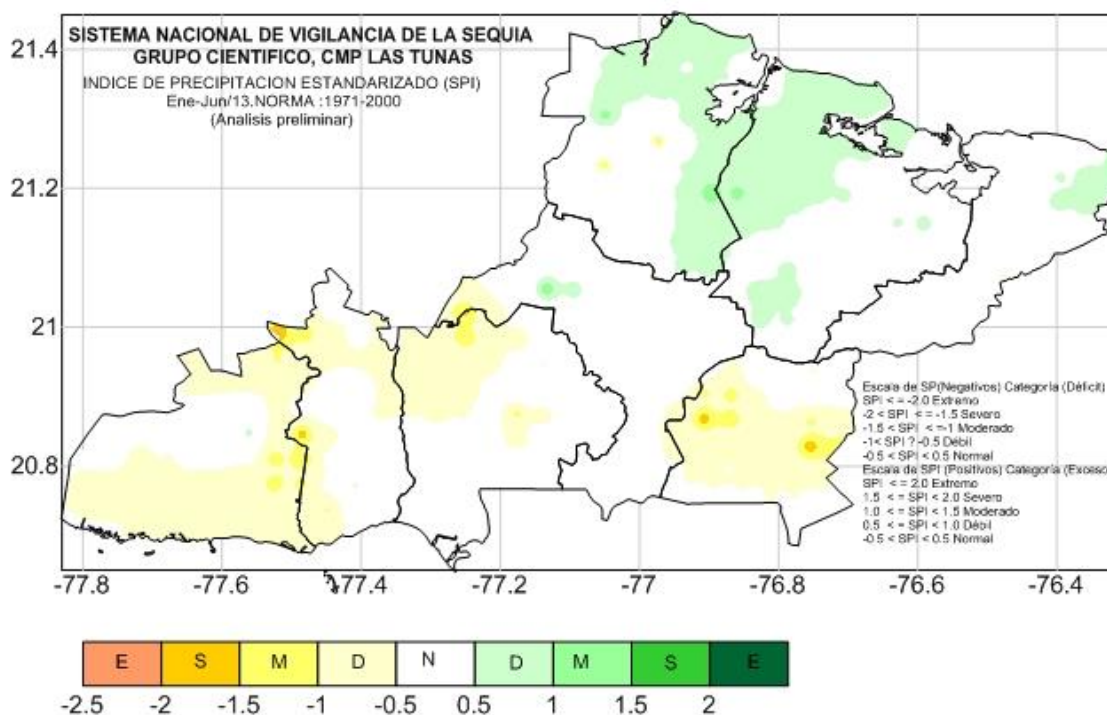


Figura 4: Mapa de Índice de precipitación estandarizado Enero-Junio/13 Norma: 1971-2000 de la Provincia de Las Tunas del segundo semestre del año 2018 (Grupos de Pronóstico 2019)

1.5. Red hidrográfica

La red hidrográfica de la región es poco densa y su importancia es muy limitada, está compuesta por los ríos Yarigua, 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 (Figura 5) (Valdés, 1987).

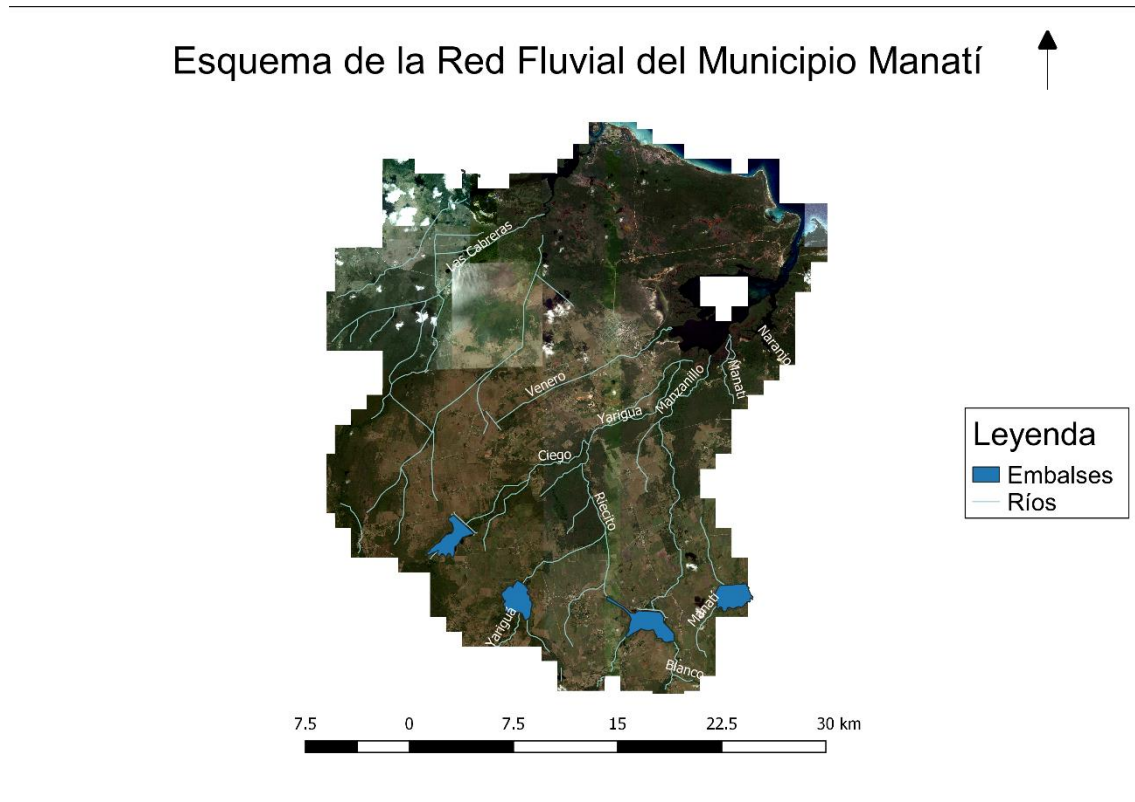


Figura 5: Red hidrográfica de Manatí Fuente: Elaboración propia

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 3, 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 (Figura 6) (Zamora 2008, p. 42).

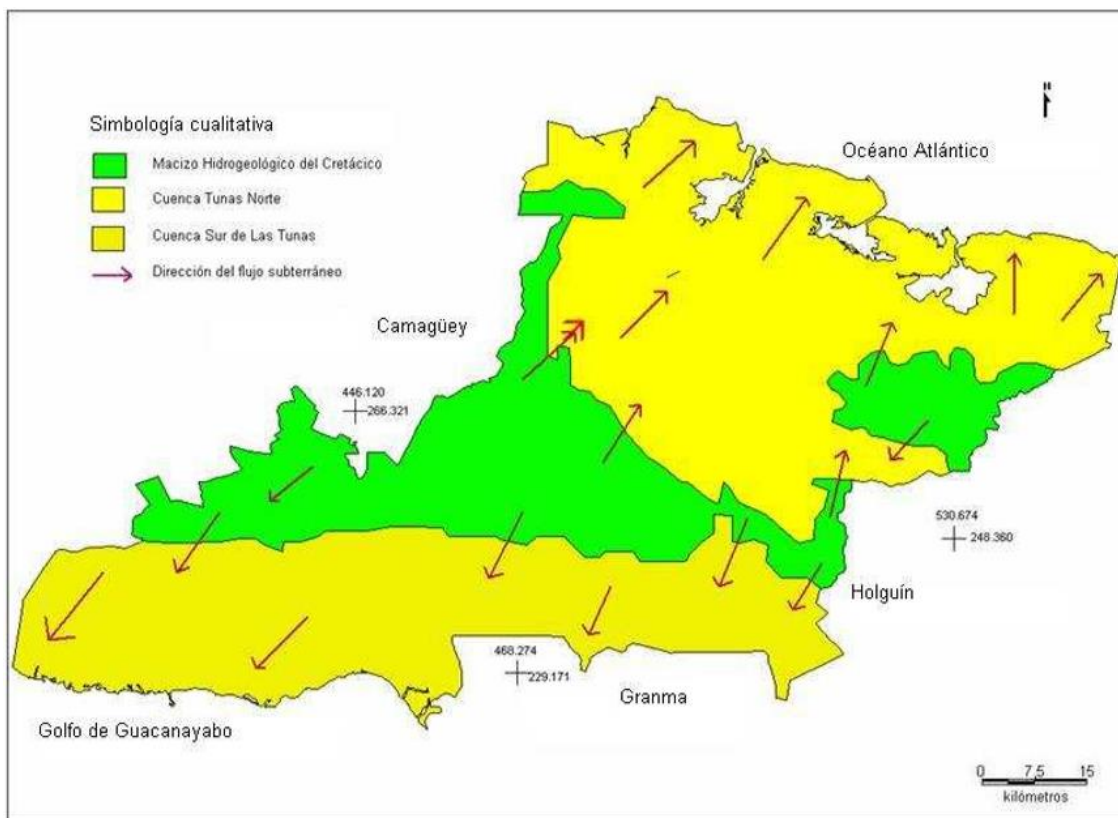


Figura 6: Estructura hidrogeológica de Las Tunas (Vázquez Fernández. E 2007)

1.6. 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 subarbustivos 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.

1.7. Desarrollo económico de la región

El Municipio de Manatí es una zona de cultivos varios que consta de dos UBPC, dos CCSF, tres 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 a el cerro de Caisimú, la Victoria y Las Catalinas.

1.8. Características geológicas regionales

Según consulta hecha al informe del levantamiento geológico a escala 1:250000 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 7).

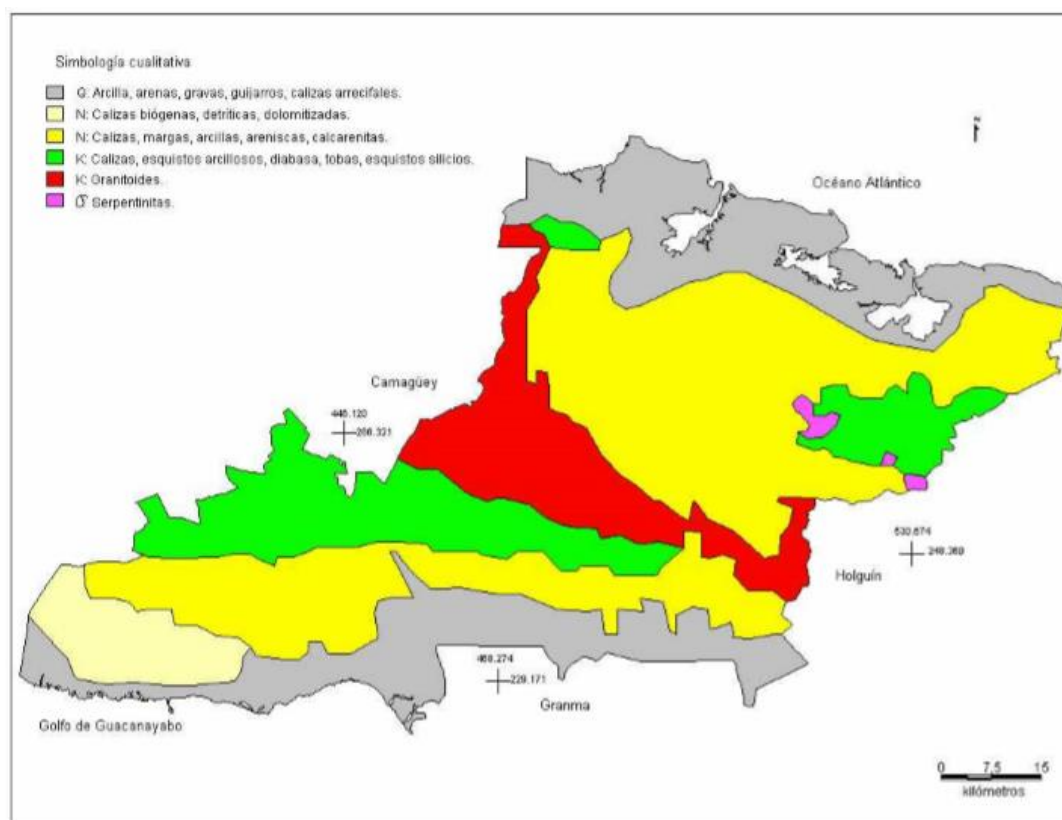


Figura 7: Mapa geológico de la provincia de Las Tunas (Vázquez Fernández. E 2007)

1.9. 8Estratigrafía regional

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. Tobas 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 y ocasionalmente biohermos. 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 Gr. Remedios. Es cubierta discordantemente por las formaciones Playa Santa Fé, 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 macrofósiles, principalmente moldes e impresiones de bivalvos siendo conspicuos en las arcillas los Ostreidae, principalmente *Ostrea Rugifera*. Ellas contienen también yeso, piritita 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 Gr. Remedios, olistostroma Haticos y las ultramafitas. Es cubierta discordantemente por la formación Jaimanitas y la cobertura aluvial.

1.10. 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 continua desde Manatí hasta San Andrés. En la zona Tunas la dirección general de la estructura principal es NE-SO; 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 (Figura 8) (Hevia Delgado 1983, p. 54).

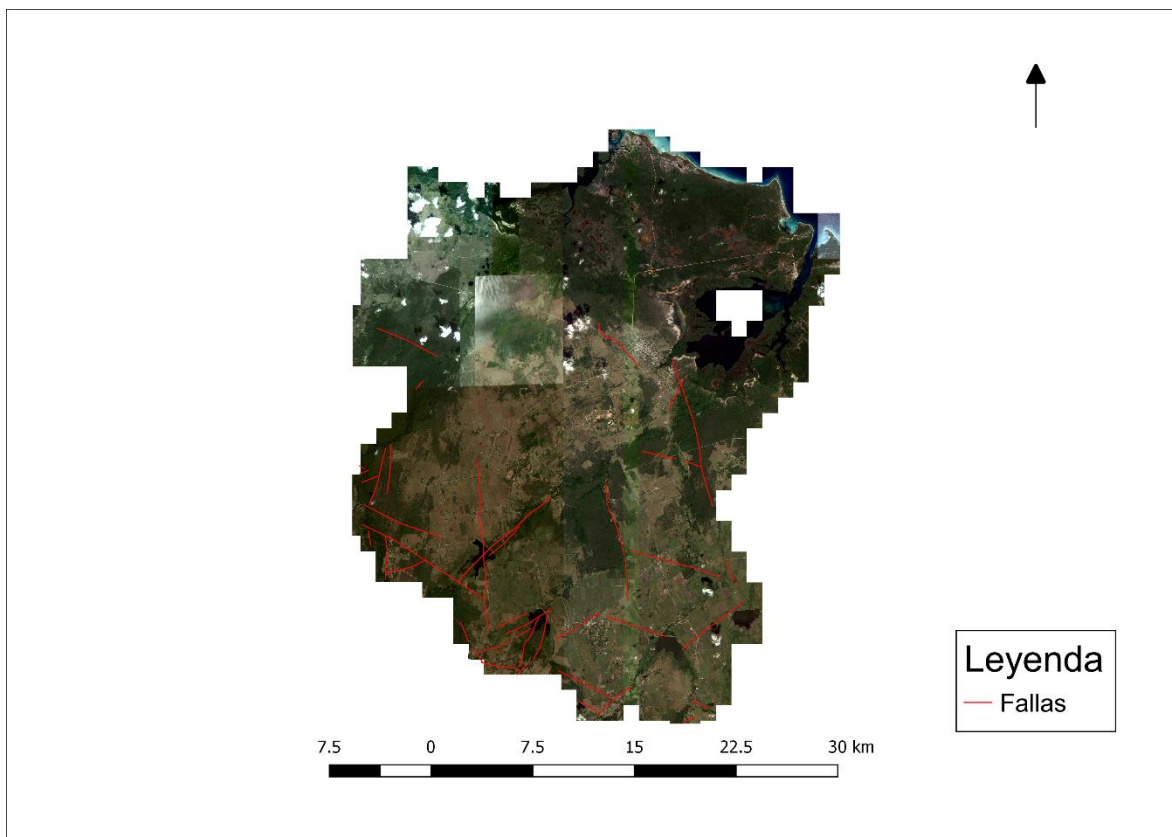


Figura 8: Mapa esquemático de la tectónica de Manatí generado a partir de una imagen satelital del municipio y el mapa geológico del IGP escala 1:100000 del año 2017

1.11. Geomorfología regional

La zona estudiada está situada en la pendiente oriental del Cerro de Dumañuecos, cuya altura es de 128m sobre el nivel del mar, siendo el mismo el punto más elevado de la región (Figura 9). En los alrededores del mismo, el terreno es casi llano, o poco ondulado. La altura promedio de la superficie del área de estudio varía desde 22-35m sobre el nivel medio del mar hasta 128 m que es la altura máxima de la región (Hevia Delgado 1983, p. 12) Según la división geomorfológica, (Atlas de Cuba-Instituto Cubano de Geología y Cartografía, La Habana, 1978) la zona de estudio y sus alrededores, pertenece a las llanuras marinas abrasivo-denudativa, ligeramente diseccionadas con alturas entre 10-20m abrasivas y abrasivo-denudativas, diseccionadas de alturas entre 20-80m, las cuales corresponden a los macizos alpinos medios de alturas menores a 500m.

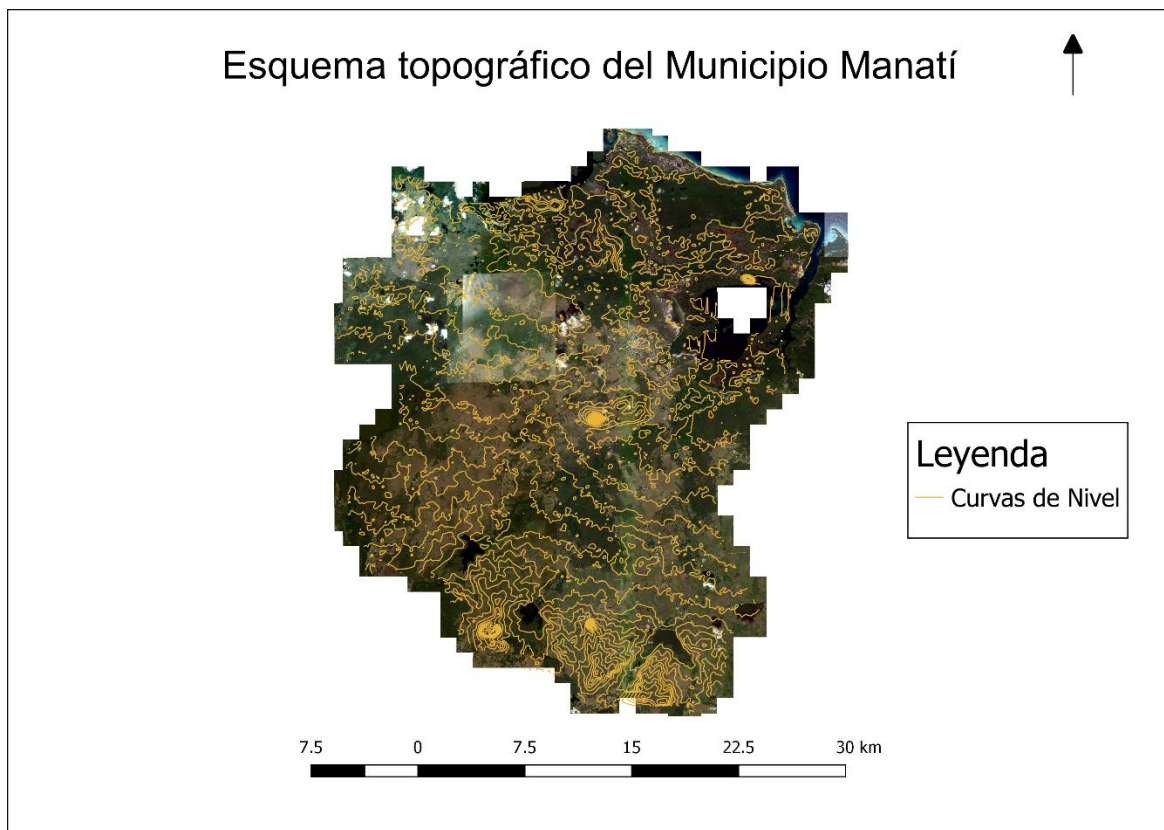


Figura 9: Esquema Topográfico de Dumañuecos generado a partir del MDT del municipio Manatí y una imagen satelital en el GLOBAL MAPER y el QGis.

1.12. Características del 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 subaereas, 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 feldespatos potásico. Las rocas ácidas presentan fenocristales de cuarzo, plagioclasa, feldespatos

Mapa de Unidades Litoestratigráficas del Municipio Manatí

Legenda

- Intersección
- Arco volcánico Cretácico
- Litosfera oceánica
- Neoplatiformal
- Capa Base

7.5 0 7.5 15 22.5 30 km

1.13. Geología del área de estudio

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 11).

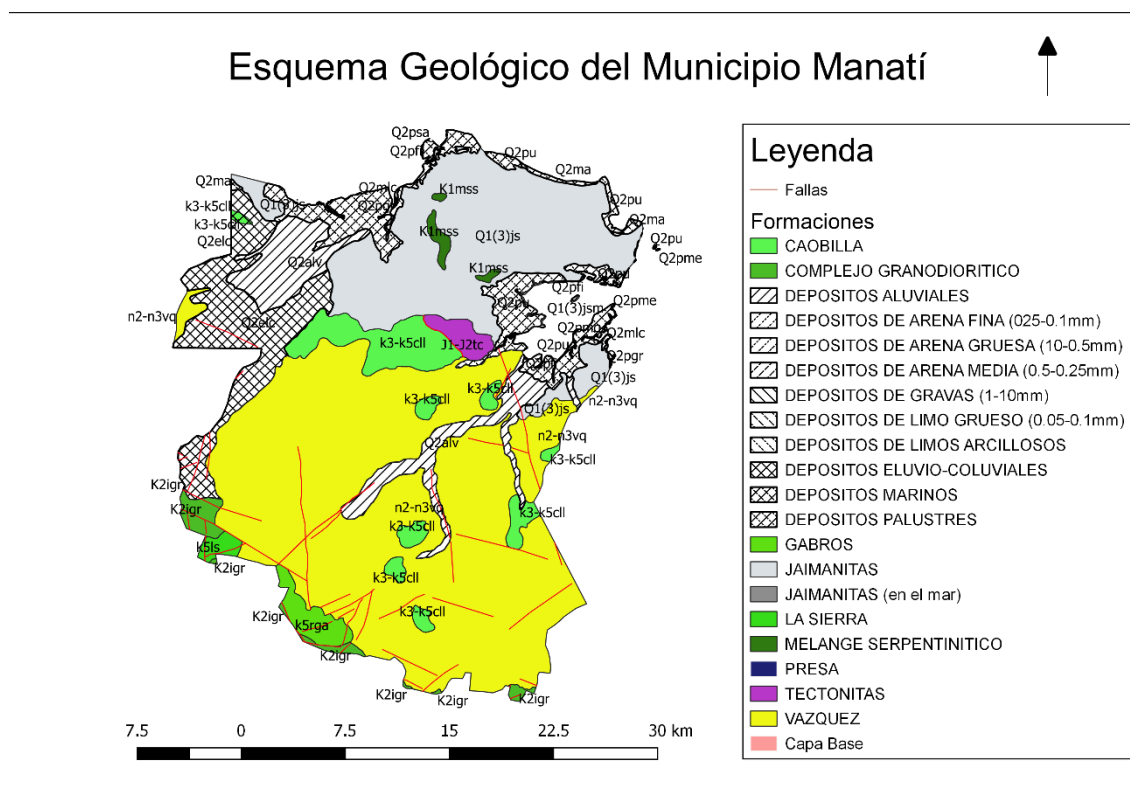


Figura 11: Esquema geológico de Manatí modificado a partir del mapa geológico del IGP escala 1:100000 del año 2017

1.14. Génesis del yacimiento Dumañuecos

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.

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).

1.15. Composición química

El contenido de SiO_2 oscila de 39,04 % hasta 70,68 %, en su mayoría se encuentra entre 40 hasta 50 %. Los contenidos de alúmina oscilan entre 13,9 hasta 33,1 %. El contenido de Fe_2O_3 oscila entre 1,99 hasta 20,32 %

predominando los valores superiores a 10 %. Las arcillas del suprayacente poseen una composición química muy variable (Hevia Delgado 1983).

1.16. Composición mineralógica

Las arcillas están constituidas principalmente por el mineral caolinita, aunque su gran variabilidad química nos indica la presencia de otros minerales que están menos distribuidos. Por ejemplo, la presencia de sulfato indica la presencia de minerales sulfurosos; el elevado contenido de trióxido de hierro indica la presencia de minerales ferrosos; el elevado contenido de sodio indica la presencia de montmorillonita y de potasio la presencia de illita. En el corte vertical del yacimiento se puede observar la transición gradual desde el caolín, que constituye la materia prima, a rocas fuertemente caolinitizadas que aún conservan relictos de la estructura primaria y posteriormente aparecen rocas cuarzo-sericíticas-caoliniticas desarrolladas en vulcanitas ácidas o vulcanitas con fuertes procesos de cuarcificación, sericitización y caolinitización acompañados por mineralización diseminada de sulfuros constituyendo una típica paragénesis hidrotermal. En estas rocas fueron encontradas también zungita y alunita, dos minerales típicos de condiciones hidrotermales de temperatura media y profundidades menores (Hevia Delgado 1983).

CAPÍTULO 2: MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

2.1. Introducción

En el presente capítulo se numeran los materiales y métodos utilizados para la realización de esta investigación, la misma estuvo dividida en tres etapas fundamentales. En la primera etapa se realiza una revisión bibliográfica de todos los materiales recopilados, que guardan relación con la investigación. La segunda etapa se dedica a la documentación y la selección de muestras para 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, determinación de la actividad puzolánica a partir de la concentración de aluminio y silicio disueltos en álcalis y determinación de la reactividad puzolánica para una dosificación de PPC30 a partir del método de correlación de François Avet. Además, se calcularon los valores de las pérdidas por deshidroxilación, se determinaron los contenidos de caolín equivalente y se empleó la metodología desarrollada por Roger Samuel Almenares Reyes en el 2017 para evaluar las potencialidades de las arcillas.



Figura 12: Etapas de la investigación

2.2. 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 nuestros 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 región oriental destacando que se han perpetrado investigaciones de este tipo en todo el país.

- De acuerdo con estudios precedentes (Pons, J.A. & Leyva 1996; Orozco 1995) las arcillas de Moa poseen un carácter semirrefractario y han sido utilizadas como morteros en los procesos de fundición de la Industria del Níquel y están siendo empleadas, en pequeños volúmenes, para la fabricación de materiales de la construcción. En las industrias locales del municipio se intentó utilizarlas como materia prima para la fabricación de tiestos, búcaros y otros, pero no se obtuvieron buenos resultados, ya que las piezas se agrietaban durante el secado y se rompían durante la cocción.
- Orozco y Leyva (Pons, J.A. & Leyva 1996; Orozco 1995) determinaron el origen geológico de las arcillas de Moa el cual está dado por la existencia de manifestaciones de arcillas caoliníticas, de las cuales una parte considerable se encuentra relacionada con cuerpos de gabros de diversas dimensiones y poseen un carácter semirrefractario.
- Rafael Villar Reyes (Villar Reyes 2005) en el Proyecto de actualización del yacimiento Arcilla Bayamo, Provincia Granma demostró que el mismo está formado por arcillas, arcillas arenosas, arenas arcillosas, gravas y gravas arenosas.
- Marabih Fadel Luali en 2005 (Fadel 2005) realizó una evaluación preliminar y caracterización de la manifestación de caolinitas en la zona de Cayo Guam, Moa, para ello se analizaron cuatro horizontes a partir de análisis de difracción

de rayos X donde quedó demostrado que predomina en el área la Gibbsita y la Caolinita.

- Yordanis Brocard Rivera (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.
- Yosvany Díaz, Dania Betancourt y José Fernando Martirena (Díaz Cárdenas, Yosvany; Betancourt, Dania; Martirena 2011) realizaron una investigación acerca de la influencia de la finura de molido de Carbonato de Calcio en las propiedades físicas-mecánicas y de durabilidad de los ladrillos de cerámica roja, donde se demostró que la finura del carbonato de calcio adicionado en muy pequeñas dosis (a partir de los 150 μm) comienza a ser beneficioso para la calidad de material en pequeñas cantidades (menos del 10 % del peso de la arcilla).
- Tendai Njila (Njila 2016) en su caracterización químico-mineralógica de cortezas de meteorización ferrosialíticas en el noreste de Cuba oriental refiere que las arcillas de Cayo Guam pueden ser empleadas para elementos refractarios.
- Adrián Días Álvarez (Díaz Álvarez 2014) realizó una evaluación de mezclas de arcillas con adición de tobas vítreas para la fabricación de ladrillos cerámicos en Bayamo. Prov. Granma. El mismo llegó a la conclusión que se puede mejorar la calidad de los ladrillos cerámicos y otros productos empleando las mezclas con tobas vítreas, aditivo que se comporta como un fundente, lo cual permite disminuir la temperatura de cocción del ladrillo y/o el tiempo que el mismo se encuentre en el horno. De las mezclas que se utilizaron y se le realizaron las pruebas correspondientes presentaron un mejor resultado aquellas que tenían un 10 % de tobas vítreas.
- Según Roger Samuel Almenares Reyes (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.

- Según Adrián Alujas (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.
- Se evaluó la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la resistencia a la compresión de los morteros confeccionados con productos de calcinación de las arcillas del yacimiento Yaguajay, resultando en todos los casos valores dentro de la norma (NC506:2007), al tiempo que se establecieron los 800°C como temperatura óptima de calcinación (Herrera del Sol 2018).
- Mario Vera Lazcano (Vera Lazcano 2018) evaluó el comportamiento térmico de la muestra compósito obteniendo un 75 % y un 2 % como valores de caolín y calcita equivalentes respectivamente. En ambos casos los contenidos favorecen la utilización de la mezcla para la obtención de cementos de bajo carbono.
- Según Roger Samuel Almenares Reyes (Almenares-reyes, Bassas-noa y Betancourt-rodríguez 2016) la solubilidad del aluminio y el silicio en álcali y la resistencia a la compresión de los sistemas LC³ es proporcional a su contenido en la arcilla, siendo superior para la de mayor contenido de caolinita y mayor desorden estructural.
- Según Daimy Caridad García Valladares (García Valladares 2015) el cemento de bajo carbono elaborado sobre la base de clínker-arcilla calcinada-caliza-

yeso, no se encuentra amparado en la normativa cubana hasta el momento, lo cual demanda un estudio profundo de la normativa internacional, de los resultados de los ensayos de las pruebas experimentales realizadas y de las normas nacionales vigentes, con el objetivo de concretar la estrategia de introducción de dicho cemento.

- Según el trabajo de doctorado de Leng Maday Vizcaíno Andrés (Vizcaíno Andrés 214d. C.). El comportamiento ante la penetración de cloruros en morteros fabricados a partir de la serie de cemento con 45 % de adición de arcilla calcinada-caliza es 10 veces superior que en los morteros de cemento Portland usados como referencia. Ello se atribuye al refinamiento de la estructura de poros y la mayor tortuosidad producida por la reacción puzolánica. Mediante la producción industrial de un cemento ternario con un factor de clínquer de 0,5 las emisiones de CO₂ asociadas a la manufactura del clínquer pueden ser reducidas entre un 25–35 % con respecto a la práctica diaria sin grandes cambios tecnológicos y con la posible reducción de los costos. Adicionalmente, posibilita incrementar los volúmenes de producción para satisfacer la demanda prevista para los próximos años.
- Según Iliané Méndez Herrada (Méndez Herrada 2015) el contenido total de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, superior al 70 %, permite asegurar que los materiales caracterizados cumplen con las recomendaciones expresadas en la ASTM C618-08 para materiales puzolánicos. Los cementos LC³ de altos volúmenes de sustitución de clínquer con incorporación de los productos de calcinación de las arcillas estudiadas, presentan mejores resultados, con valores de resistencia a la compresión superiores a los de las series equivalentes de morteros elaborados con un 30 % de sustitución de CPO por arcillas calcinadas.

2.3. Trabajos de campo y muestreos

La revisión bibliográfica previa permitió establecer que existen cortezas caoliníticas formadas por alteración hidrotermal de distintos niveles de rocas ácidas. El depósito es conocido por haber tenido en su momento las reservas de mayor calidad de caolín del país. La particularidad de este yacimiento es que la

reserva de caolín primario está agotada, sin embargo, existen inmensas escombreras que poseen reservas de arcillas caoliníticas considerables. Actualmente se extrae de las escombreras pequeños volúmenes para la producción de ladrillos por parte de la Empresa de Materiales de Construcción de las Tunas. Los pobladores de la zona usan también las escombreras para la producción artesanal de ladrillos.

El criterio de muestreo no se rige por regularidades geológicas dado la naturaleza antrópica de las escombreras. Se hicieron siete compósitos de diferentes escombreras, previendo el desarrollo local futuro que pudieran generar.

Las escombreras se dividen en dos grupos, las del norte se caracterizan por presentar materiales arcillosos de elevada plasticidad, de coloración gris que pueden llegar a ser blancas, con intercalaciones de rocas del proceso de explotación de la mina.

Las escombreras sur por su parte están compuestas por arcillas caoliníticas que no se explotaron para cerámica fina, pero de una gran pureza en general. Es de señalar que para el muestreo y descripción se siguió el mismo procedimiento que para los depósitos naturales.

Está reportado en la literatura que se explotaron los cuerpos de caolín 1 y 2 del yacimiento quedando el cuerpo 3 sin destapar. No se prevé la explotación de este cuerpo, debido a los grandes volúmenes de destape que hay que extraer para iniciar su explotación, por lo que se considera no factible desde el punto de vista económico.

Se desarrolla en toda la zona una capa de suelo que posee baja plasticidad.

Dumañuecos en décadas pasadas fue una cantera de caolín de alta pureza; en la actualidad los cortes in situ de arcilla caolinítica 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).



Figura 13: Vista panorámica del yacimiento actual Dumañuecos

La antigua mina de arcillas caoliníticas está inundada por casi 30 metros de agua. Estas poseen una coloración azul verdosa y los pobladores de la zona refieren que el baño fue prohibido por contener las mismas concentraciones de metales pesados, entre ellos cobre (Figura 13).

Punto 1:

Coordenadas:

Latitud: 21° 16' 7,389''

Longitud: -76° 57' 28,4064''

Descripción:

Se identificó un material arcilloso de una coloración blanca, granulometría fina y muy deleznable, con bajo grado de compactación y una gran plasticidad al entrar en contacto con agua, este pertenecía al rechazo de la cantera de explotación. Sobre esta escombrera se observan fragmentos de la roca madre que presentan un alto grado de oxidación. En el área cercana se observaron rocas oxidadas, con sulfuros visibles (pirita, calcopirita) y existe un sombrero de hierro bien desarrollado en las áreas adyacentes (Figura 14).



Figura 14: Arcillas caoliníticas blancas rodeadas por rocas ácidas oxidadas superficialmente

Punto 2:

Coordenadas:

Latitud: 21° 16' 5,2386''

Longitud: -76° 57' 26,84731''

Descripción

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, es muy deleznable y muestra una granulometría fina característica de los materiales arcillosos. Son cortes de hasta 10 m de altura que demuestran un acarcavamiento acentuado originado por la exposición a los agentes climáticos y en la parte superior se desarrolla un suelo incipiente con un pobre desarrollo de la vegetación (Figura 15).



Figura 15: Detalle del surco de muestreo en escombrera

Punto 3:

Coordenadas:

Latitud: 21° 16' 1,96538''

Longitud: -76° 57' 27,06186''

En este punto se tomó la tercera muestra compósito, en él se identificó un material arcilloso de una de las escombreras del yacimiento Dumañuecos con una coloración pardusca rojiza probablemente por la presencia de un alto contenido de hierro. Se encontró un gran número de fragmentos de roca de coloración predominantemente oscura y con dimensiones muy variables. Este material se comporta plástico al entrar en contacto con agua, es muy deleznable y muestra una granulometría fina, encajando esto con las características más comunes de los minerales del grupo de las arcillas. Se encuentran cortes de hasta 8 m de altura, que exhiben un acarcavamiento acentuado originado por la exposición a los agentes atmosféricos y producto de la cual en la parte superior se ha desarrollado una capa de suelo de unos 15 cm de espesor propiciando el crecimiento de una capa vegetal poco madura (Figura 16).



Figura 16: Escombrera

Pozo 1:

Coordenadas:

Latitud: 21° 16' 0,05546''

Longitud: -76° 57' 37,26216''

Descripción:

Se intentaron realizar 4 perforaciones manuales (Figura 17), en todos los casos la roca de basamento apareció antes de los 40 cm. El suelo es de color pardo gris claro. Encima se desarrolla una capa de gramíneas, cuyas raíces apenas profundizan los 5 cm. La plasticidad es pobre comparada con el material de las escombreras y como se ha indicado es de poca potencia. Solo aflora en el área de escombreras norte. En todo caso se documentó y muestreó este material y se elaboró un compósito con todas las muestras de las perforaciones.

Se tomó la muestra compósito 4 conformado por los pozos 1, 2, 3 y 4.



Figura 17: Perforación pozo 1

2.4. Preparación de las muestras y realización de los ensayos

2.4.1. Preparación de las muestras

Las muestras fueron preparadas en el laboratorio físico del Instituto de Tecnología de Karlsruhe (Figura 18). Una vez desempacados fueron depositados en bandejas plásticas y secados a temperatura ambiente.



Figura 18: Paquetes de muestras

2.4.2. Preparación para Difracción de Rayos X y Rayos X Diferenciales

Las muestras para Difracción de Rayos X se dividieron en dos grupos (Figura 19), las primeras fueron secadas a 40°C durante doce horas, luego fueron molidas en un molino de anillos en húmedo (Figura 20), usando 15ml 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 19: Cuarteo en bandejas



Figura 20: 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 21).



Figura 21: 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 (Figura 22). 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 22: Máquina de ultrasonido y muestras en disolución con rápido asentamiento de la fracción no arcillosa



Figura 23: 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.

2.4.3. 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 2g 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.

2.4.4. 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.

2.4.4.1. 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 por un período de tiempo de 1 h. 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.

2.4.4.2. Molienda

La molienda se realizó manualmente 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 para lograr la granulometría deseada llegando al nivel de un talco con un nivel de finura por debajo de las 90 μ , siendo esta la granulometría ideal para este trabajo.

2.4.4.3. 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 y el crisol determinar el contenido neto de muestra contenido en cada crisol. Además, se repitió este proceso de pesado y resta par cada temperatura de calcinación (350, 750, 850) y de esa manera se obtuvieron los valores netos de muestra contenido en cada crisol que fue calcinado.

2.5. Métodos de análisis

2.5.1. 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 $\text{CuK}\alpha$ y una rejilla de divergencia de $0,5^\circ$. Las muestras fueron analizadas entre los 0 y los 80° (2θ), a un paso angular de $0,008^\circ$ y un tiempo por paso de 30 segundos (Figura 24).



Figura 24: 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, así como fichas disponibles en la base de datos www.mindat.org.

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 polimineraleas, 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, illita-esmectita, 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.

2.5.2. Análisis Térmico Diferencial

Las muestras previamente molidas y secadas a 105°C fueron analizadas en un equipo NETZ 5CH para Análisis térmico simultáneo, modelo STA 409. El intervalo de temperatura ambiente hasta 1000°C, a razón de 10°C/min. Se utilizó atmosfera sintética de oxígeno.

2.5.3. 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:

1. 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.
2. 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°C).
3. El crisol se introdujo nuevamente en la mufla y se calentó hasta 350°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°C).
4. Luego se introdujo en la estufa y se calentó hasta 750°C durante una hora. Se aplicó el mismo procedimiento para enfriar la muestra y determinar su masa. Este valor se registró como m (750°C).

5. Por último, se introdujo en la estufa y se calienta hasta 800°C durante una hora. Se aplicó el mismo procedimiento para enfriar la muestra y determinar su masa. Este valor se registró como $m(800^{\circ}\text{C})$ (Figura 25).



Figura 25: Horno eléctrico y desecadora de vidrio

Para una mayor confiabilidad de los resultados de este ensayo se deben realizar al menos 3 réplicas y utilizar una balanza semi-analítica con una precisión no menor de ± 1 mg. Además, se emplearon herramientas de laboratorio para una manipulación de las muestras.

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 (Figura 26).

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

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

Figura 26: Formulas para el cálculo de caolín equivalente y pérdida de masa por deshidroxilación

2.5.4. Metodología de Almenares Reyes del 2017

Esta metodología fue creada por Almenares Reyes en el 2017, en ella se toman en consideración los valores límites permisibles de la composición de la arcilla para la fabricación del cemento de bajo carbono (Tabla 1).

Tabla 1: Criterios límites con los valores determinados (Almenares Reyes 2017)

	Criterios límites
Al₂O₃	>18,0 %
CaO	<3,0 %
SO₃	<2,0 %
Al₂O₃/SiO₂	>0,3 %
PPI	>7,0 %

Teniendo en cuenta las características de la muestra en función del contenido de minerales arcillosos, el gráfico PPI (350-850 °C) vs. Al₂O₃ puede dividirse en cuatro zonas o regiones. La región I incluye aquellas arcillas con relativamente altos contenidos de minerales arcillosos del grupo de la caolinita (KE > 60 %), y por tanto, excelentes potencialidades de ser utilizadas como fuente de MCS. La región II enmarca aquellas arcillas con contenidos de minerales arcillosos, expresados como Ke, entre 40 y 60 %. La zona III del diagrama se refiere a aquellas arcillas con bajos contenidos de caolinita (KE <40 %), pero con contenidos relativamente altos de arcillas de tipo 2:1. La zona IV del diagrama incluye aquellas arcillas con variables contenidos de minerales arcillosos pero con contenidos apreciables de otros minerales no arcillosos que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura, fundamentalmente carbonatos, sulfatos y sulfuros (*Figura 27*).

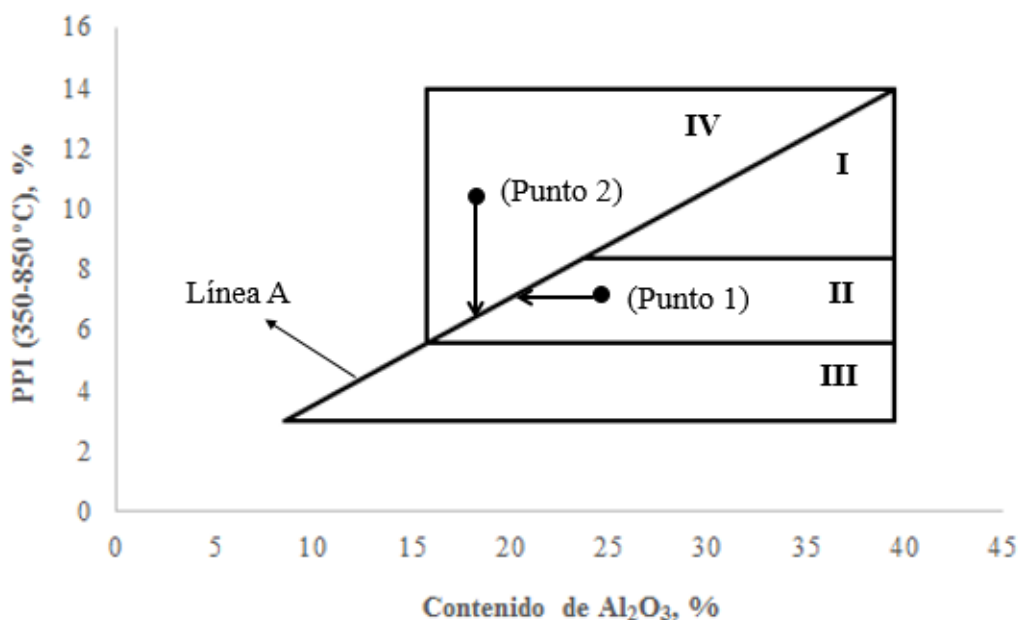


Figura 27: Clasificación de arcillas de acuerdo a su potencial (Almenares Reyes 2017)

Debido a que no se pudo determinar el estado de oxidación del azufre se empleó el contenido en elemento y se calculó el posible contenido de SO_3 utilizando el coeficiente establecido internacionalmente y se comparó con la norma **NC-Ts528 del 2007** (Tabla 2).

Tabla 2: Requisitos químicos de la norma NC-Ts528 del 2007

	Clase de Aditivo Mineral		
	N	F	C
Dióxido de Silicio (SiO_2) más Óxido de Aluminio (Al_2O_3) más Óxido de Hierro (Fe_2O_3), min. %	70,0	70,0	50,0
Trióxido de Azufre (SO_3), máx. %	4,0	5,0	5,0
Contenido de Humedad, máx. %	3,0	3,0	3,0
Pérdida por Ignición, máx. %	10,0 ^a	6,0 ^b	6,0
^a Para el caso de puzolanas naturales que contengan en su composición mineralógica contenidos de zeolitas se excluye este requisito, tal es el caso de las tobas zeolitizadas que se emplean como puzolanas y que han demostrado una buena actividad tanto con el cemento como con la cal. ^b El uso de puzolanas clase F que contienen una pérdida por ignición mayor que 12,0 % pueden ser aprobadas por el consumidor si los reportes de cumplimiento de aceptación o los resultados de los ensayos de laboratorio la hacen utilizable.			

2.5.5. Determinación de la actividad puzolánica a partir de la concentración de aluminio y silicio disueltos en álcalis

La muestra se descompone mediante la solución de NaOH al 0,5 N. De la muestra se pesa 0,2 g en un beaker de 200 mL, se lleva a la plancha de calentamiento a

250°C por un periodo de 3 min, luego se enfría y se trasvasa a un volumétrico de 250 mL donde llega a su volumen final (Figura 28) . Se homogeniza y se toma una alícuota de 20 mL de la solución anterior y se transfiere a un volumétrico de 50 mL donde se le añaden 5 mL de HCl 1:1 y se enraza con agua destilada y se vuelve a homogeneizar.

La medición espectrofotométrica se realiza por absorción atómica en un espectrómetro modelo Solar 929 tipo UNICAM, empleando como fuentes de radiación lámparas de cátodo hueco y la longitud de onda fundamental de cada elemento y como fuente de atomización, llama de óxido nitroso–acetileno para el silicio y el aluminio.



Figura 28: Mezcla de arcilla en NaOH y disolución de NaOH a 0.5 mol/L

2.5.6. 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 29).

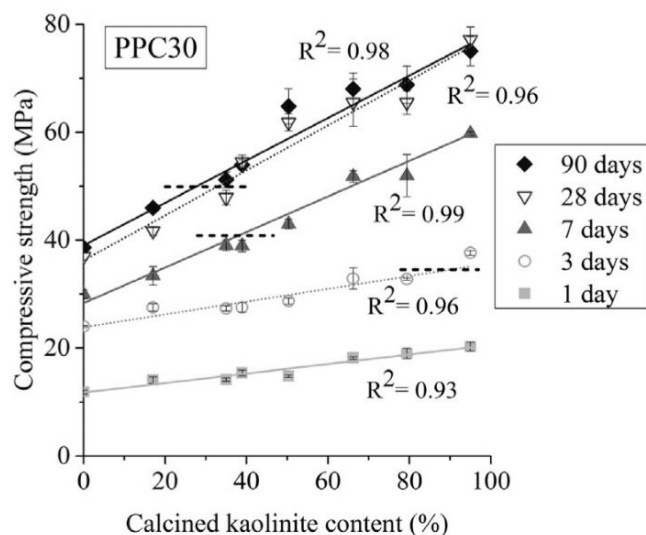


Figura 29: Gráfico de correlación de la resistencia a la compresión relativa a la mezcla PPC30 contra el contenido de caolín equivalente de las arcillas calcinadas (Avet et al. 2016)

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 3: 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 ² /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	25	25	NC 506
			7 días	35	35	
			28 días	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 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Análisis de los resultados de la caracterización química y mineralógica de las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos

3.1.1. 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 SO_3 y se utiliza como 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 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 4).

Tabla 4: Resultados de la composición química determinada por Fluorescencia de Rayos X

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

3.1.2. 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 (Figura 30). 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.

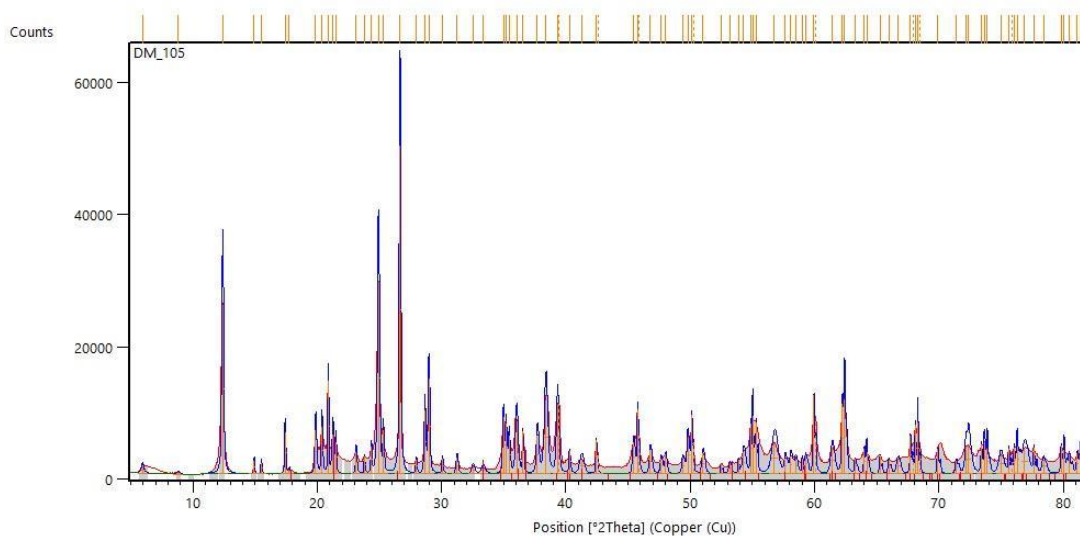


Figura 30: Difractograma de la Difracción de Rayos X de las muestras arcillosas

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 ángstroms, se asume una estructura desordenada (Figura 32). La cuantificación arrojó como resultados caolinita (52 %), nacrita (30 %) illita (5 %), moscovita (10 %) y montmorillonita (3 %) (Figura 31) (Tabla 5).

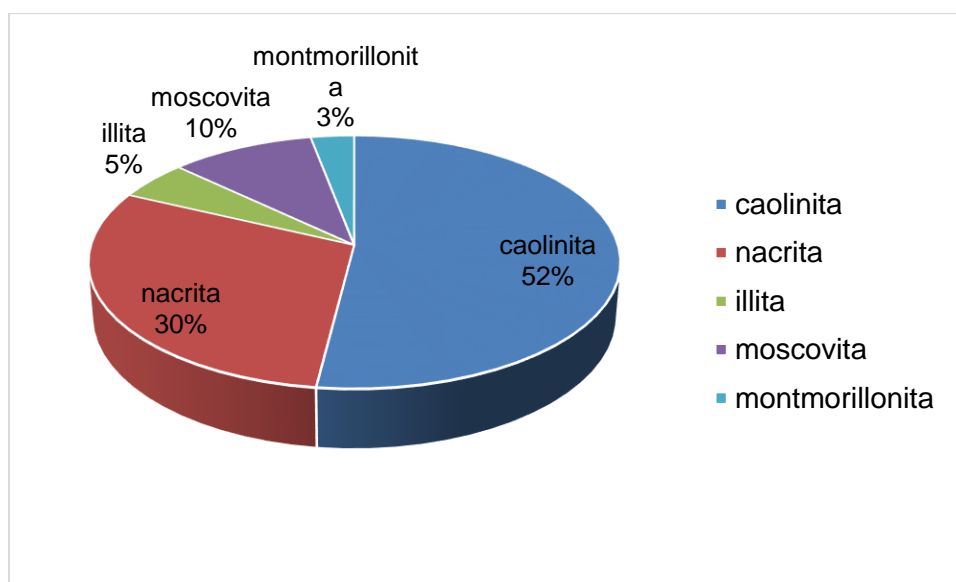


Figura 31: Cuantificación de los minerales identificados

Tabla 5: 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	

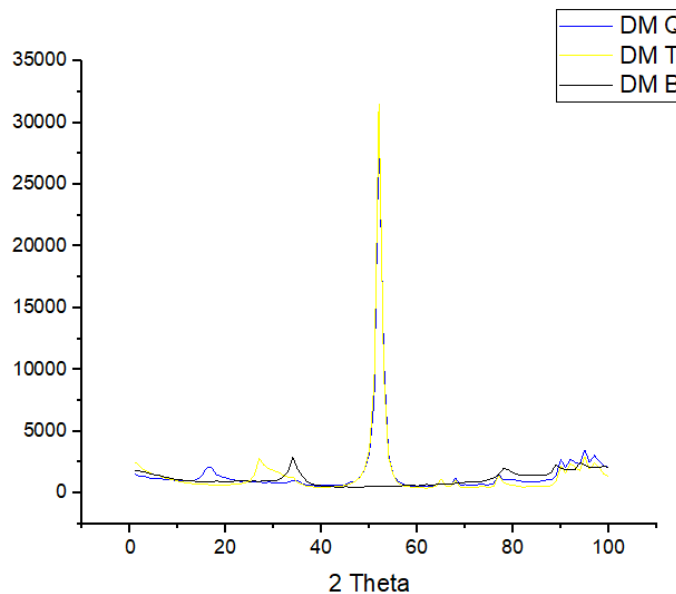


Figura 32: Difractograma de la Difracción de Rayos X Diferenciales superpuestos

3.1.3. Resultados del análisis térmico diferencial

En la muestra de arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos la pérdida de masa esta segmentada en cuatro intervalos fundamentales. Hasta los 200°C se pierde el agua estructural de los minerales arcillosos y micáceos. Entre los 250 y 400°C se observa una ligera pérdida de masa asociada a la descomposición de la jarosita, que se intensifica entre los 450 a 750°C producto de la descomposición conjunta del grupo caolinita e illita. El pico

541°C probablemente este asociado a la descomposición de la caolinita y el pico 647 a la montmorillonita (Figura 33).

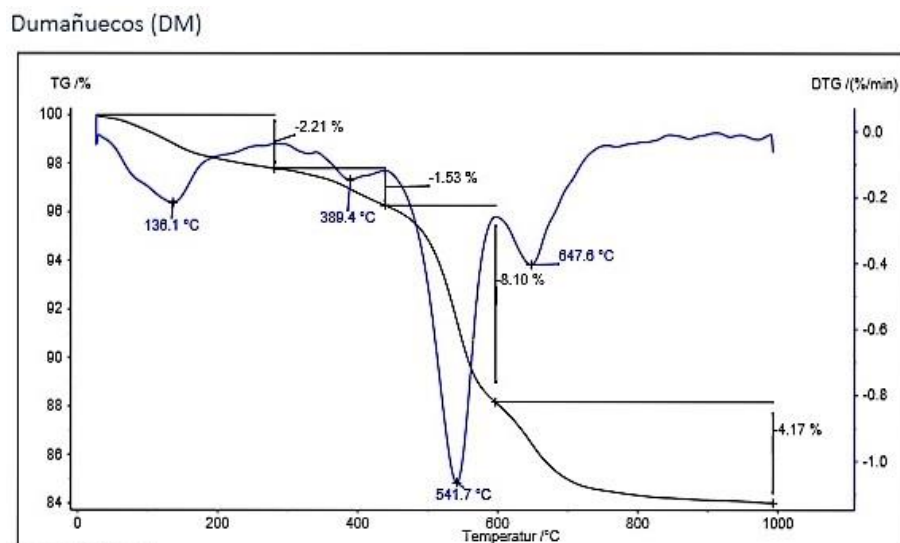


Figura 33: Resultado del Análisis Térmico Diferencial

3.2. 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 caolínicas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos (Tabla 6), se calcularon los valores de pérdida de masa por deshidroxilación. El valor de pérdida de masa por deshidroxilación más elevado registrado fue de 13,4 %, registrado a los 850°C. Las muestras reportaron un valor promedio de 13,3 % 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 a 850°C (Figura 34). Los valores elevados de pérdidas de masa por deshidroxilación están influenciados por la presencia de jarosita en estas arcillas.

Tabla 6: Resultados de la calcinación

Temperatura	Peso
200°C	98,18 g
350°C	97,38 g
750°C	84,53 g
800°C	84,32 g
850°C	84,20 g

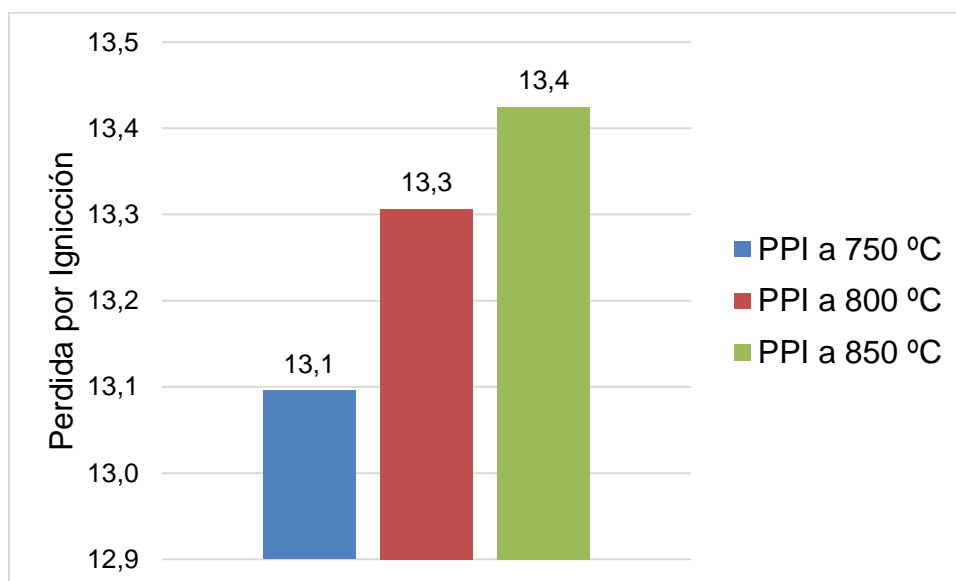


Figura 34: Valores de pérdida de masa por deshidroxilación

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 96,2, registrado a 850°C (Figura 35). Las muestras de arcillas caoliníticas reportaron un contenido promedio de 95,1 % de caolín equivalente, lo que indica el alto nivel de pureza de estas arcillas.

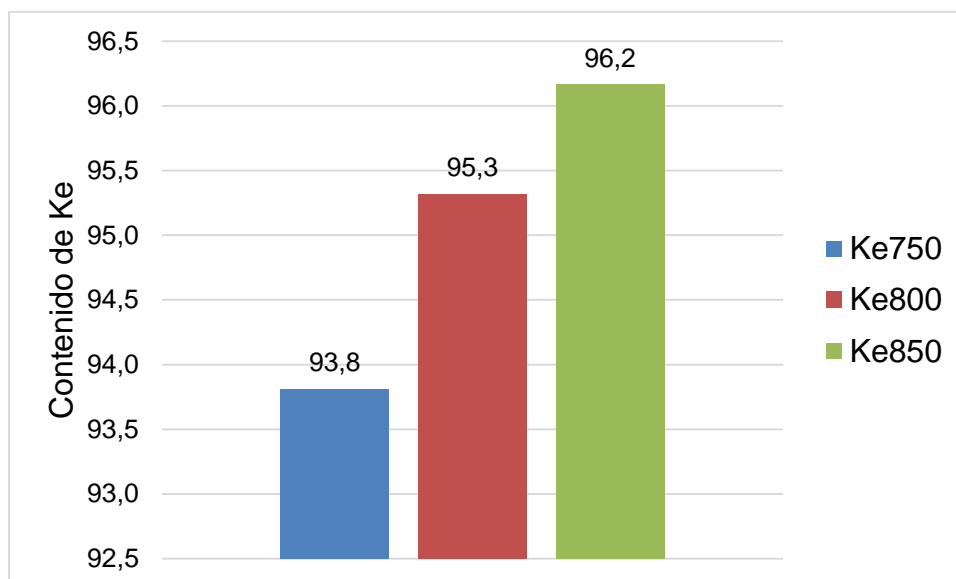


Figura 35: Contenidos de caolín equivalente

3.3. Evaluación de la influencia de la temperatura y la composición mineralógica en la reactividad puzolánica

La Figura 38 muestra los porcentajes de Al_2O_3 , SiO_2 y $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ solubles en una solución alcalina que simula el pH de la solución de poros del cemento Portland. El análisis de los valores de SiO_2 permite establecer que existe una tendencia a disminuir la solubilidad con el aumento de la temperatura. En el caso del Al_2O_3 , la solubilidad tiene una tendencia a aumentar con la temperatura, en cambio a partir de los 800°C se observa una caída de la concentración propiciada por el proceso de formación de nuevas fases cristalinas estables dentro de la disolución. La suma $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ posee una relación directa con la temperatura que se ve con una tendencia a aumentar, con una importante disminución a los 850°C . La mejor temperatura de calcinación es la de 800°C , ya que a esta se registraron los valores óptimos de Al_2O_3 y SiO_2 solubles y es donde la muestra debe presentar menor cristalinidad, esto tiene una relación directa con la puzolanicidad que van a presentar estas arcillas (Figura 36).

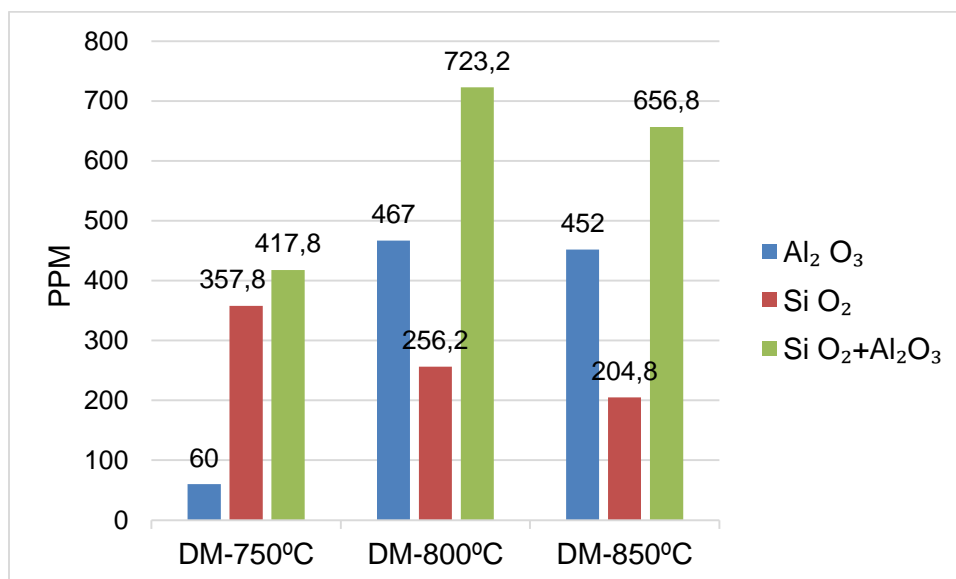


Figura 36: Valores de alúmina y sílice disueltos

Con el aumento de la temperatura se registró una tendencia al incremento del contenido de caolinita equivalente en la muestra, originado por el proceso de deshidroxilación de los minerales del grupo de la caolinita. Se determinó que luego de los 800°C ocurre una disminución apreciable de la alúmina soluble, asociada a la destrucción de los minerales portadores de aluminio (Figura 37).

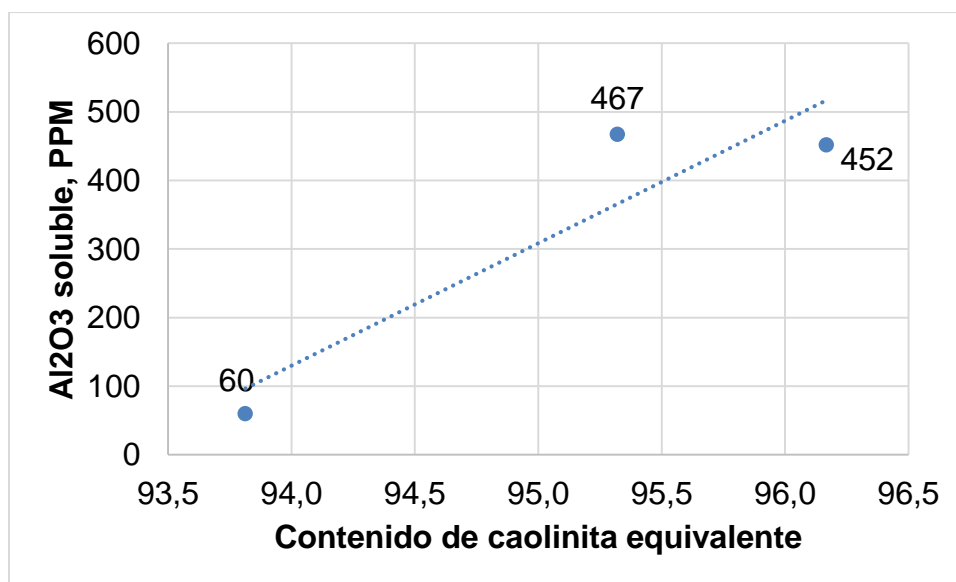


Figura 37: Relación entre el contenido de caolinita equivalente y el Al soluble

3.4. Resultado del análisis de la resistencia a la compresión mecánica a partir del método de correlación de François Avet

Según el método de correlación de François Avet se pronosticó una resistencia a la compresión mecánica para una dosificación de PPC30, que desde los 3 días de curado supera los valores de la norma cubana NC-506 (NC 506: 2013 2013). Ya a los 7 días la resistencia a la compresión pronosticada duplica los valores establecidos por la norma **NC -506** para cemento P-35. La mayor resistencia se pronosticó a los 28 días de curado en las arcillas calcinadas a 850°C, pero la diferencia con el valor alcanzado por las arcillas calcinadas a 800°C es insignificante, por lo que se considera que a los 800°C es la temperatura óptima de calcinación para estas arcillas (Figura 38).

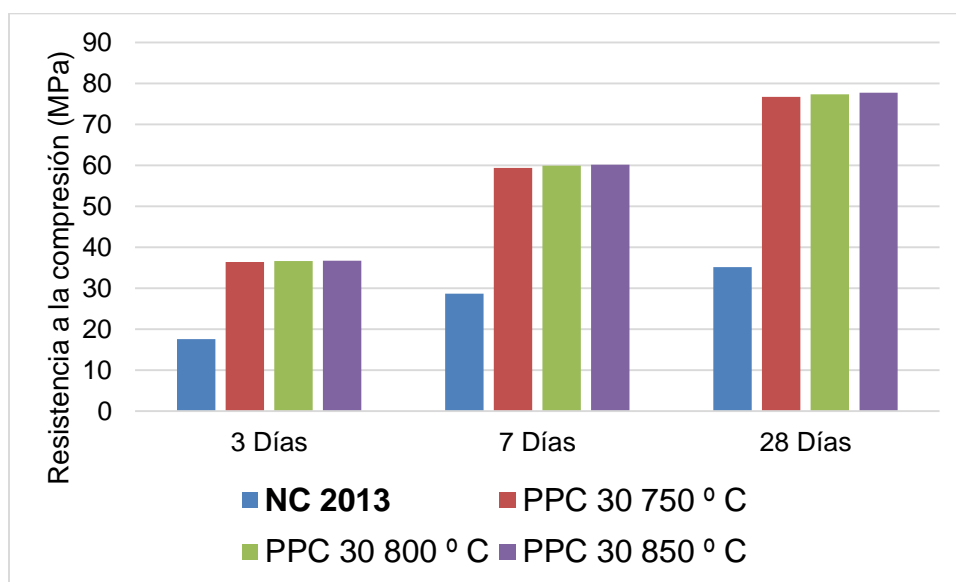


Figura 38: Correlación de la resistencia a la compresión para una dosificación de PPC30 por el método de François Avet

3.5. Evaluación de las potencialidades según la metodología de Almenares Reyes del 2017

Luego del cálculo del valor de las pérdidas de masa por deshidroxilación determinado para la muestra de arcillas caoliníticas, se estableció un valor máximo de 13,4 % a la temperatura de 850°C (Tabla 7) de pérdida de masa por deshidroxilación lo que representa un 6 % por encima del criterio establecido por la norma (Almenares Reyes 2017). El contenido de Al_2O_3 determinado, fue de 27,83 % lo que es muy superior al valor límite establecido por Almenares Reyes

que es de 18 %, los contenidos de CaO son tan bajos que están por debajo del límite de detección de la técnica analítica. Durante la determinación de los contenidos del azufre total no se contó con las herramientas para determinar el estado de oxidación de este. Con coeficientes establecidos internacionalmente se calculó el posible contenido de SO₃, este se encuentra por encima del criterio límite establecido por Almenares Reyes que es de 2,0 % o menos, lo que puede ser perjudicial a la hora de la calcinación. La relación Al₂O₃/SiO₂ fue de 0,6 %, esto representa el doble del valor mínimo establecido por Almenares Reyes que es de 0,3 %. Por los valores determinados según los criterios límites establecidos por Almenares Reyes se puede decir que las arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos son perspectivas para producir cemento de bajo carbono, pero debe de tenerse en cuenta la presencia de considerables contenidos de SO₃, que pueden ser perjudiciales para el cemento pero según la norma NC-Ts528 del 2007 los valores pueden ser permisibles (Normalización 2007) (EIA 2013).

Tabla 7: Tabla de comparación de los criterio límite establecido por Almenares Reyes contra los valores determinados en las muestras de arcillas caoliníticas de las escombreras del yacimiento Dumañuecos

	Criterio límite	Resultados
Al ₂ O ₃	>18,0 %	27,83 %
CaO	<3,0 %	ND
SO ₃	<2,0 %	3,59 %
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	>0,3 %	0,61 %
PPI	>7,0 %	13,3 %

Según la clasificación para la evaluación de las potencialidades de los depósitos arcillosos como fuente de materiales cementicios suplementarios desarrollada por Almenares (Almenares Reyes 2017) las arcillas se ubica en el grupo IV de la

clasificación, se pronostica que deben presentar un contenido de caolín equivalente variable y es característico la presencia de contenidos apreciables de minerales no arcillosos que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura que los minerales del grupo de la caolinita, fundamentalmente sulfatos y sulfuros. Esto está en consonancia con los resultados químicos que reportaron valores de azufre y con los resultados mineralógicos se identificó la presencia de jarosita. A la hora de la calcinación de estas arcillas se deben tener en cuenta la ocurrencia de procesos potencialmente negativos y la estrategia de calcinación debe ser diseñada teniendo en consideración la presencia de jarosita, que según el análisis térmico diferencial entre los 250 y 400°C registra una ligera pérdida de masa asociada la descomposición de este mineral. Por la alta variabilidad que presentan este tipo de arcillas se evalúan independientemente (Figura 39).

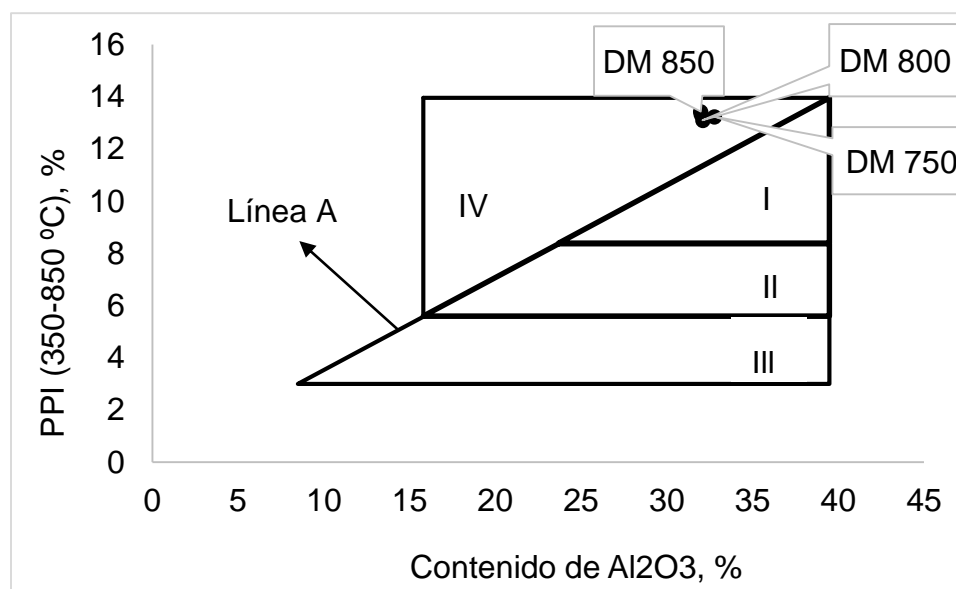


Figura 39: Potencialidades de las arcillas de Dumañuecos

Por los contenidos relativamente abundantes de minerales no arcillosos que son térmicamente activos y que se descomponen en el mismo intervalo de temperatura de los minerales arcillosos, las pérdidas de masa fueron corregidas para evitar la sobreestimación del contenido de minerales arcillosos. El contenido de minerales arcillosos para la muestra cuya composición las ubica por encima de esta línea A se obtiene por el método gráfico al extrapolar su ubicación a la línea A, a partir de una línea paralela al eje de contenido de PPI y tomando el contenido

de Al_2O_3 como criterio definitorio. Se estableció que las pérdidas de masa por deshidroxilación es de 11,7 % y el contenido de caolín equivalente es de 83,81 %. Por estos valores se evalúan estas arcillas como de Tipo I y se considera que tienen excelentes potenciales para ser usadas como MCS.

CONCLUSIONES

- Se determinaron bajos valores de sodio, magnesio, calcio, manganeso, hierro, carbono y fósforo y alta concentración de sílice y alúmina en las arcillas; además se determinaron valores elevados de titanio, potasio y azufre. En todos los casos se puede decir que cumple con los criterios de preselección química.
- 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.
- Las arcillas presentaron un valor promedio de pérdidas de masa por deshidroxilación de 13,3 % y el contenido promedio de caolín equivalente determinado fue de 95,1 %.
- La temperatura óptima de calcinación es la de 800°C ya que a esta se registraron los mayores valores de solubilidad de Al_2O_3 y SiO_2 .
- Se pronosticó el mayor valor de resistencia a la compresión mediante el método de correlación de François Avet para los veintiocho días de curado para las arcillas calcinadas a 850°C (77,8 MPa). Este duplica los valores establecidos por la norma NC-506 para cemento P-35.
- Según la metodología de Almenares Reyes del 2017, estas son arcillas de tipo IV. Se pronostica que deben presentar un contenido de caolín equivalente variable y la presencia de contenidos apreciables de sulfatos y sulfuros.

RECOMENDACIONES

- Evaluar en qué estado de oxidación se encuentra el azufre dentro del yacimiento.
- Determinar la resistencia a la compresión de las arcillas calcinadas en morteros normalizados para su comparación con el resultado obtenido por el método de correlación de François Avet.
- Determinar el volumen de recursos y reservas presentes en las escombreras del yacimiento Dumañuecos para poder cuantificar sus perspectivas reales como futura fuente de materia prima para la producción de cemento de bajo carbono.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 (LC 3) Evaluation of kaolinite clays of Moa for the production of cement based. *Minería y Geología*, vol. 32, no. 4, pp. 63-76.

ALMENARES REYES, R.S., 2017. *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de materiales cementicios suplementarios*. S.l.: UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS.

ALUJAS, A., 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponentes*. S.l.: Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas.

AVET, F., SNELLINGS, R., ALUJAS, A. y BEN, M., 2016. Development of a new rapid, relevant and reliable (R-3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays . *Cement and Concrete Research*, vol. 85, pp. 1-11.

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.l.: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. "Antonio Núñez Jiménez".

CEMBUREAU, 2013. *The role of cement in the 2050 low carbon economy* [en línea]. Brussels, Bélgica: s.n. Disponible en: <http://www.cembureau.eu>.

CISNERO, A., 2010. *Caracterización Geoquímica De Las Cortezas De Meteorización Alíticas En Cuba Oriental: Zonas De Moa-sagua De Tanamo*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez".

COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NC/CTN 22 DE CEMENTO, 2011. NC 95: 2011 Cemento Portland - Especificaciones. La Habana, Cuba. ,

DÍAZ ÁLVAREZ, A., 2014. *Evaluación de mezclas de arcillas con adición de tobas*

vítreas para la fabricación de ladrillos cerámicos. Bayamo. Prov. Granma. S.I.: INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA.

DÍAZ CÁRDENAS, YOSVANY; BETANCOURT, DANIA ; MARTIRENA, J.F., 2011. *Evaluación del uso del carbonato de calcio como aditivo fundente en la producción de ladrillos de cerámica roja. S.I.: Univercidad Central Marta Abreu de Las Villas.*

EIA, 2013. International energy outlook 2013. [en línea]. Washington, EE.UU: Departamento de Energía. Disponible en: <http://www.eia.gov/ieo/>.

FADEL, M., 2005. *Evaluación preliminar y caracterización de la manifestación de caolinitas en la zona de Cayo Guam, Moa. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.*

FERIA ÁVILA, H., 2004. Estudio de las variables climáticas de la provincia de Las Tunas. ,

GARCÍA VALLADARES, D.C., 2015. *Fundamentación de normativas para la inserción del Cemento de Bajo Carbono (LC³) en las normas cubanas. S.I.: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.*

GRUPOS DE PRONÓSTICO, C. e I. y C., 2019. <http://www.metltu.cu.> .

HENDRIKS, C., WORRELL, E., JAGER, D., BLOK, K. y RIEMER, P., 2004. *Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry. Interlaken, Suiza: s.n.*

HERRERA DEL SOL, D., 2018. *Evaluación de los tipos tecnológicos de arcillas del yacimiento Yaguajay, para la producción de cemento de bajo carbono LC³. S.I.: Universidad Central Marta AbreuLas Villas.*

HEVIA DELGADO, L.F., 1983. Informe final de Exploración Complementaria en el yacimiento de caolín Dumañuecos. Prov. Las Tunas. . Las Tunas:

MÉNDEZ HERRADA, I., 2015. *Evaluación de yacimientos arcillosos cubanos como fuente de materia prima para la producción de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínquer. S.I.: Universidad Central “Marta Abreu”*

de Las Villa.

MÜLLER, N. y HARNISCH, J., 2008. A blueprint for a climate friendly cement industry. . Nuremberg, Alemania: Universidad de Ciencias Aplicadas Offenburg.

NC 506: 2013, 2013. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. . La Habana, Cuba.

NJILA, T., 2016. Estudio Químico-mineralógico De Los Perfiles Lateríticos Ferrosialíticos En Los Sectores Téneme. , pp. 67-83. DOI 10.15517/rgac.v54i0.21149.

NORMALIZACIÓN, N.N. 22Cement. C.T. de, 2007. NC-TS 528: 2007 Cemento hidráulico-puzolana-especificaciones. , pp. 10.

OROZCO, G., 1995. *Caracterización de las arcillas de Cayo Guam. Informe técnico.* ISMM. S.I.: Instituto Superior Minero Metalurgico de Mos.

PONS, J.A. & LEYVA, C., 1996. Empleo de las arcillas ferrocaoliníticas – gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición. *Minería y Geología*, vol. 13, no. 3, pp. 93-97.

ROESSLER, C. y STARK, J., 2003. Der Einflußvon Fließmitteln auf die Hydratation von Portlandyement. *IBAUSIL*. Weimar: s.n., pp. 1-523.

TALAVERA CORONEL, F; ECHEVARRIA, B; TCHOUNEV, D; IANEV, S; TZANKOV, T., 1986. Características generales del vulcanismo en la región Ciego de Ávila-Camagüey-Las Tunas(Cuba). *Ciencias de la Tierra y del Espacio* 11/86, pp. 25.

TIRONI, A., TREZZA, M.A., IRASSAR, E.F. y SCIAN, A.N., 2012. Thermal Treatment of Kaolin: Effect on the Pozzolanic Activity. *Procedia Materials Science* [en línea], vol. 1, pp. 343-350. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.046>. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812812000478>.

U.S., 2017. *Geological Survey, Mineral commodity summaries 2017: U.S.* 2017.

USA: s.n.

VALDÉS, G.C., 1987. *Proyecto de búsqueda detallada, exploración orientativa y detallada de caliza. Manatí, Provincia Las Tunas*. S.l.: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.

VANDERLEY, M.J., 2002. *On the sustainability of the Concrete*. 2002. S.l.: s.n.

VERA LAZCANO, M.A., 2018. *Evaluación de la actividad puzolánica y comportamiento térmico de las arcillas del yacimiento Yaguajay como materia prima para la producción de cemento de bajo carbono*. S.l.: Universidad Central Marta AbreuLas Villas.

VILLAR REYES, R., 2005. *Proyecto de actualización del yacimiento Arcilla Bayamo, Provincia Granma*. S.l.: s.n.

VIZCAÍNO ANDRÉS, L.M., 214d. C. *Sistema cementicio ternario clinquer – arcilla calcinada – caliza*. La Haba: UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS.

WBCSD, 2015. *carbon technology partnerships initiative (LCTPi)* [en línea]. 2015. Geneve, Suiza: s.n. Disponible en: <http://www.lctpi.wbcsdservers.org/>.

WBCSD y IEA, 2009. *Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon Emissions Reductions up to 2050*. S.l.: Paris, France.

ZAMORA, V.M., 2008. *Geoquímica de las aguas subterráneas de La Provincia de Las Tunas*. S.l.: s.n.